

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Омский государственный технический университет»

Радиотехнический факультет  
Кафедра «Физика»

# **НАНОТЕХНОЛОГИИ. ИНФОРМАЦИЯ. РАДИОТЕХНИКА (НИР-23)**

**Материалы  
Всероссийской молодежной научно-практической  
конференции**

**(Омск, 18 апреля 2023 года)**

Научное текстовое электронное издание  
локального распространения

Омск  
Издательство ОмГТУ  
2023

УДК 620.3+621.37+004  
ББК 30.600.3+32.84+32.81  
Н25

Редакционная коллегия:

*Н. О. Голубятникова*, ст. преп. каф. РТУиСД ОмГТУ;  
*В. А. Егорова*, канд. техн. наук, доц. каф. физики ОмГТУ;  
*М. И. Минеева*, асс. каф. ССИБ ОмГТУ;  
*А. Ю. Никифорова*, асс. каф. КЗИ ОмГТУ;  
*О. М. Сухарева*, ст. преп. каф. физики ОмГТУ

**Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-23)** : материалы Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. (Омск, 18 апр. 2023 г.) / Минобрнауки России, Ом. гос. техн. ун-т, Радиотехн. фак., Каф. «Физика» ; редкол.: Н. О. Голубятникова [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – 1 CD-ROM (18,01 Мб). – Систем. требования: процессор с частотой 800 МГц и выше ; 128 Мб RAM и более ; свободное место на жестком дис-ке 300 Мб и более ; Linux / Windows XP и выше ; MacOS X 10.4 и выше ; CD/DVD-ROM-дисковод ; ПО для просмотра pdf- и mp4-файлов. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-8149-3675-2.

Рассмотрены вопросы, касающиеся следующих направлений: наноматериалы и нанотехнологии; материаловедение и физика материалов; радиотехнические системы; радиоэлектроника и радиофизика; информационная безопасность; инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Издание адресовано научным сотрудникам, аспирантам и студентам, а также всем, кого интересуют проблемы современной науки.

*Ответственность за содержание материалов несут авторы*

*Издается в авторской редакции*

*Компьютерная верстка Ю. П. Шелехиной*

*Для дизайна этикетки использованы материалы  
из открытых интернет-источников*

*Секция*  
**Материаловедение и физика материалов**

*Под редакцией О. М. Сухаревой, В. А. Егоровой*

УДК 620.22-419.8:621.893:678.5.067-022.532

*В. О. Алексенко, Д. Г. Буслевич, Ц. Ло, С. В. Панин*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

**ВЛИЯНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЁНКИ ПЕРЕНОСА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПИ И ПЭИ В ТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ**

**Аннотация.** Исследованы структура, механические и трибологические характеристики трехкомпонентных нанокompозитов на основе аморфных термопластов полиимида (ПИ) и полиэфиримида (ПЭИ), армированных рублеными углеродными волокнами (РУВ), и одновременно наполненных нанотрубками различной природы (искусственные – углеродные – и природные – галлуазит), в точечном трибологическом контакте при комнатной температуре 23°C. В точечном контакте нанокompозит ПЭИ/10РУВ/1ГНТ характеризовался максимальной износостойкостью и отсутствием микроабразивного повреждения металлического контртела ( $R_a = 0,02$  мкм). Предложен эффект образования трибологического слоя за счет механизмов ползучести и перемешивания, позволяющий защитить (экранировать) контактирующие поверхности. Благодаря сочетанию более высокой технологичности и меньшей стоимости нанокompозит на основе ПЭИ, наполненный РУВ и ГНТ, является перспективным недорогим материалом для изготовления деталей металлополимерных узлов трения.

**Ключевые слова:** полиимид, полиэфиримид, углеродные волокна, углеродные нанотрубки, нанотрубки галлуазита, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, трибологический слой.

**I. Введение**

Высокомолекулярные термопластичные полиимиды (ПИ, ПЭИ), обладая высокими механическими свойствами в широком интервале температур, привлекают разработчиков полимерных композитов с точки зрения антифрикционных применений. Однако, несмотря на все присущие им достоинства, ненаполненные полиимиды практически не применяются для изготовления деталей трибоузлов. Это обусловлено тем, что по причине высокой прочности и коэффициента трения они испытывают значительный износ в условиях сухого трения скольжения [1]. Распространенным путем решения данной проблемы является введение твердосмазочных наполнителей, позволяющих уменьшать износ и коэффициент трения сопряженных деталей в узлах трения. В последнее время внимание исследователей приковано к созданию нанокompозитов на основе различных полимерных матриц. Одной из наиболее исчерпывающих работ в этом направлении следует считать монографию под редакцией проф. К. Фридриха [2]. Как в данной монографии, так и в других исследованиях, посвященных исследованиям трибологических характеристик нанокompозитов, показано, что нанонаполнители могут существенно влиять на свойства пленки переноса. Углеродные наноматериалы используются в качестве добавок для улучшения свойств объемных материалов в течение последних двух десятилетий из-за их беспрецедентных физических и химических свойств, а также для применения в трибологии. Нанотрубки галлуазита (ГНТ) привлекли внимание своим потенциальным использованием в различных приложениях

благодаря их механической прочности, термической стабильности, распространенности в природе и низкой стоимости. В работе [3] предложен механизм получения нанокompозитов ПИ/ГНТ. Предел прочности при растяжении и модуль Юнга нанокompозитов ПИ/ГНТ были повышены на 62,8 % и на 63,7 % соответственно, при содержании 3 мас.% ГНТ.

Что касается трибологических характеристик композитов на основе ПИ/ГНТ, насколько нам известно, наша работа — это первое исследование, в котором используются ГНТ для повышения износостойкости композитов на основе ПИ и ПЭИ. Что касается других полимеров, то в работе [4] было обнаружено, что включение ГНТ в эпоксидную матрицу в низких концентрациях эффективно для придания жесткости и отверждения. При наполнении 1 об.% композиты показали улучшение до 50% модуля упругости и 100% твердости по сравнению с чистой эпоксидной смолой, основываясь на данных наноиндентирования. Кроме того, на основе проведенных трибологических исследований показано, что в зависимости от ориентации ГНТ в композите уменьшается объем царапин на 50% при фиксированных уровнях нагрузки.

В настоящей работе проведено исследование трибологических характеристик нанокompозитов на основе ПИ и ПЭИ, наполненных природными (коммерчески доступными) нанотрубками галлуазита (а также для целей сравнения широко изученными углеродными нанотрубками/УНТ). Использовали металлическое (сталь ШХ15) контртело при точечном (схема «шар-диск») контакте.

## **II. Материалы и методы исследования**

В работе использовали порошки ПИ (Solver PI-Powder 1600) и ПЭИ (Solver PEI ROOH, Китай) со средним размером частиц 16 и 20 мкм, соответственно. В качестве армирующих наполнителей вводили рубленые углеродные волокна (РУВ),  $l = 2$  мм (ООО «ЗУКМ», Челябинск). В качестве нанопополнителей применяли нанотрубки углерода TUBALL™ (OCSiAl, Новосибирск, Россия), а также галлуазита (ОАО "Галлуазит-Урал", Екатеринбург, Россия). Твердость по Шору D оценивали на приборе «Instron 902». Механические свойства исследовали при испытаниях на растяжение образцов в форме двойной лопатки на электромеханической машине «Instron-5582» (Instron, США). Трибоиспытания при точечном контакте проводили по схеме «шар-диск» на трибометре CSEM CH2000 (CSEM, Швейцария) при нагрузке  $P = 5$  Н и скорости скольжения  $V = 0,3$  м/с. Дистанция испытания составляла 1 км, радиус траектории вращения – 16 мм. Радиус контртел в виде шариков из стали ШХ15 составлял 6 мм (стандарт ASTM G99). Шероховатость поверхности контртела составляла  $Ra=0,02$  мкм. Анализ топографии поверхностей дорожек трения проводили на оптическом микроскопе Neophot 2 (Carl Zeiss, Jena, Германия).

## **III. Результаты экспериментов**

Механические характеристики композитов на основе матриц ПИ и ПЭИ, дисперсно наполненных армирующими волокнами (РУВ) и модифицирующими нанопополнителями (УНТ и ГНТ), отличаются незначительно (табл. 1): модуль упругости, предел прочности, удлинение до разрушения ненаполненного ПЭИ превышают соответствующие характеристики ПИ на ~10%. В армированных РУВ композитах на основе обоих полимеров модуль упругости  $E$  возрастает вдвое, а предел прочности  $\sigma_U$  увеличивается на ~ 12–20 %. Удлинение при растяжении армированных композитов уменьшилось в 4–5 раз. Наполнение же РУВ-армированных композитов нанотрубками углерода и галлуазита (1 вес. %) несущественно повлияло на механические характеристики для обоих типов полимеров (табл. 1). Таким образом, факт влияния на трибологические свойства за счет изменения механических свойств может быть исключен.



Таблица 1

**Физико-механические характеристики для чистого ПИ и ПЭИ,  
а также для нанокмполитов на их основе**

№	Композит	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость по Шору D	Модуль упругости, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение при разрушении, %
1	ПИ/ ПЭИ	1,37/ 1,26	80,2± 0,8/ 79,9±0,3	2,60±0,69/ 3,12±0,15	110,7±1/ 123,1±0,5	13±0,7/ 16,1±1,2
2	ПИ/10РУВ ПЭИ/10РУВ	1,42/ 1,31	80,6±0,4/ 81,4±0,3	6,40±0,33/ 6,54±0,43	152,1±6,4/ 153,2±12,5	5,9±0,3/ 3,7±0,6
3	ПИ/10РУВ/1УНТ ПЭИ/10РУВ/1УНТ	1,4/ 1,32	80,9±0,64/ 81,3± 1,1	6,04±0,15/ 5,59±0,05	115,5±5,4/ 118,8±4,7	3,1±0,2/ 3,4±0,2
4	ПИ/10РУВ/1ГНТ ПЭИ/10РУВ/1ГНТ	1,39/ 1,31	81,0±0,5/ 81,9±1,0	5,94±0,21/ 6,03±0,17	121,5±4,7/ 127,0±1,4	3,4±0,2/ 3,7±0,2

Далее описано влияние нанонаполнителей на трибологические характеристики армированных композитов на основе ПИ и ПЭИ в условиях точечного и линейного трибосопряжений.

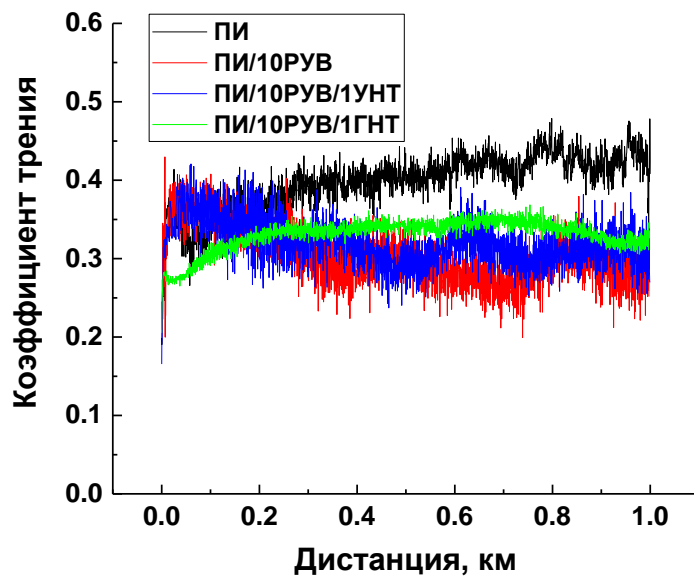
В таблице 2 приведены интегральные значения трибологических характеристик исследованных композитов. Видно, что при армировании полиимида РУВ его коэффициент трения (CoF) уменьшается на 8%, а последующее введение нанотрубок обоих типов (углеродных и галлуазита) сопровождается лишь незначительным его увеличением. При введении в РУВ-армированный ПЭИ нанотрубок галлуазита коэффициент трения снижается на 8% по сравнению с ненаполненным полимером.

Таблица 2

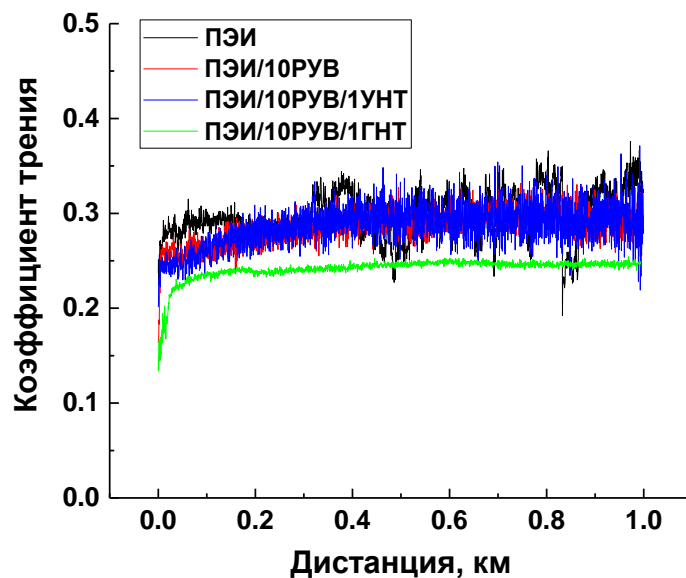
**Трибологические характеристики для чистого ПИ и ПЭИ,  
а также для нанокмполитов на их основе**

№	Композит	Коэффициент трения, CoF	Интенсивность изнашивания WR, 10 <sup>-6</sup> мм <sup>3</sup> /Н·м
1	ПИ/ ПЭИ	0,388±0,012 / 0,297±0,026	134,16±18,5 / 390,21±20,51
2	ПИ/10РУВ ПЭИ/10РУВ	0,304±0,036 / 0,286±0,018	27,86±3,42 / 30,39±2,68
3	ПИ/10РУВ/1УНТ ПЭИ/10РУВ/1УНТ	0,320±0,030 / 0,295±0,017	29,2±3,27 / 21,28±2,15
4	ПИ/10РУВ/1ГНТ ПЭИ/10РУВ/1ГНТ	0,331±0,020 / 0,241±0,012	31,95±2,86 / 5,37±0,59

На рис. 1 приведены временные зависимости CoF для всех исследованных материалов. В случае ПИ (рис. 1а), оба композита ПИ/10РУВ и ПИ/10РУВ /1УНТ характеризуются заметной осцилляцией CoF, чем они отличаются от нанокмполита ПИ/10РУВ/1ГНТ. Однако высокое значение CoF, сопоставимое с ненаполненным ПИ, не позволяет характеризовать их как антифрикционные. В случае ПЭИ значение CoF~0,3 несколько ниже, чем в ПИ (CoF~0,39). С другой стороны, в нанокмполите ПЭИ/10РУВ/1ГНТ изменение CoF во времени не сопровождается какой-либо выраженной осцилляцией при минимальном среднем значении CoF~0,24.



(а)



(б)

Рис. 1. Временные зависимости коэффициента трения композитов на основе ПИ (а) и ПЭИ (б)

Проведена оценка интенсивности изнашивания WR (табл. 2). Видно, что: во-первых, интенсивность изнашивания ненаполненного ПЭИ втрое выше, чем ПИ (причем значение  $CoF$  для ПИ даже выше на  $\sim 0,1$ ); во-вторых, армирование ПИ углеродными волокнами повышает износостойкость композита в 4,8 раз, а модифицирование его дополнительно нанонаполнителями лишь незначительно повышает сопротивление изнашиванию (на 9–12%); в-третьих, армирование ПЭИ углеволокном снижает WR в 13 раз по сравнению с ненаполненным полимером, а последующее модифицирование УВ-армированного полимера УНТ дополнительно снижает WR в 1,5 раза, в то время как для галлуазита это повышение составляет 6 раз.

Для выявления причин наблюдаемых отличий проведен анализ фотографий поверхностей скольжения контртел, а также (нано)композитов на основе ПИ и ПЭИ. На поверхности дорожек трения ПИ-композитов наблюдалось налипание продуктов

изнашивания, которые, однако, не экранируют (не защищают) стальное контртело от выступающих над поверхностью армирующих РУВ (рис.2а). Это согласуется с шероховатым (изрезанным) профилем дорожек трения (рис.2д). Введение УНТ несущественно меняет характер износа. При наполнении нанотрубками галлуазита (природного происхождения, представляющего каолиновые двухслойные пакеты) исключается факт абразивного износа стального шарика (рис. 2б). Видно, что на поверхности скольжения полимерного нанокompозита формируется устойчивый («укатанный») трибослой (рис. 2г). При этом существенного снижения коэффициента трения не происходило.

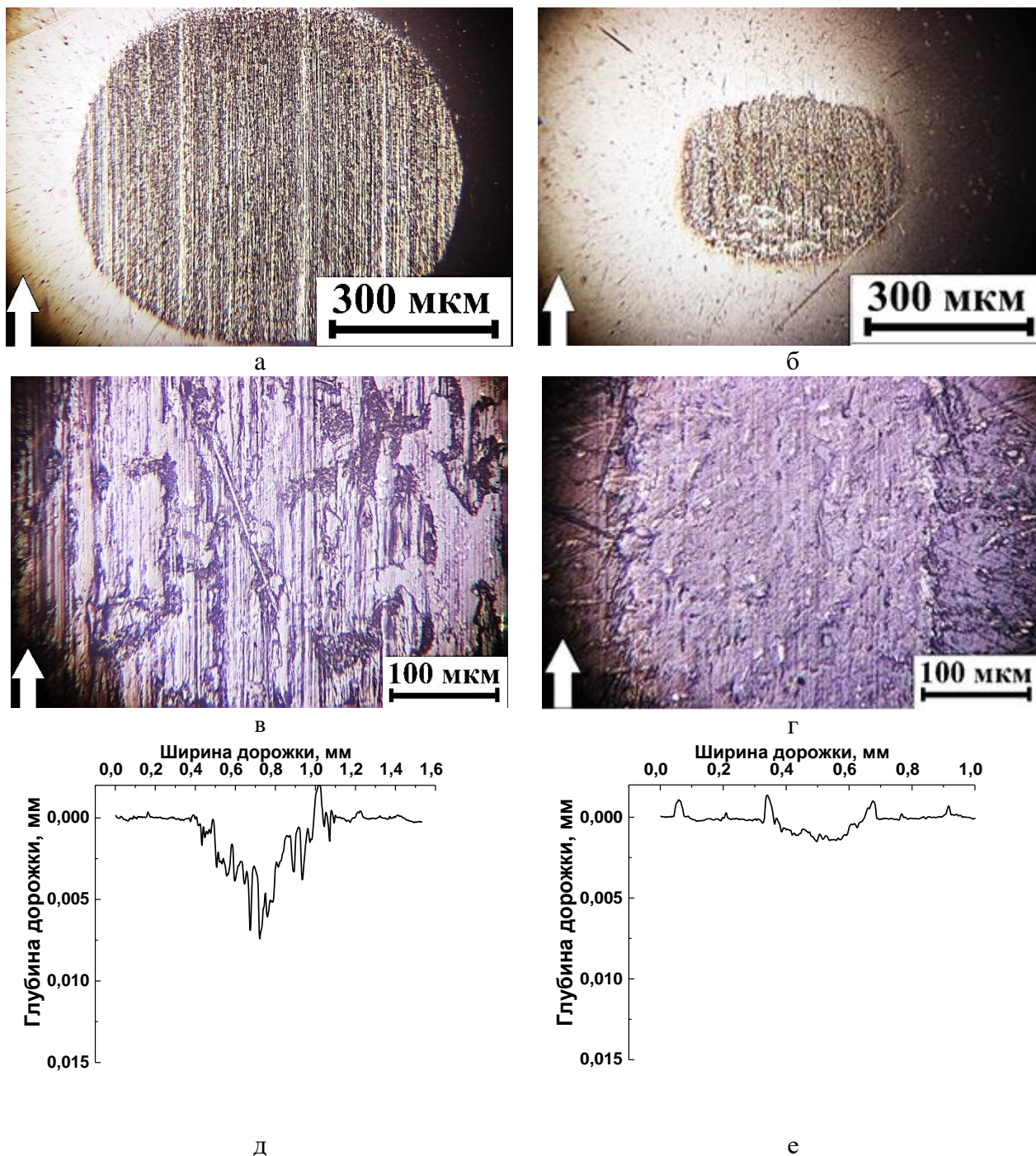


Рис. 2. Микрофотографии металлического контртела (а, б) и поверхностей трения (в, г), профили износа образцов (д, е) при трении по ПИ/10РУВ/1ГНТ (а, в, д), ПЭИ/10РУВ/1ГНТ (б, г, е).

Таким образом, единственным нанонаполнителем, позволившим исключить изнашивание металлического контртела и обеспечившим невысокий износ при относительно высоком уровне коэффициента трения, были нанотрубки галлуазита.

## VI. Заключение

Исследованы трибологические характеристики трехкомпонентных композитов на основе аморфных термопластов ПИ и ПЭИ, армированных рублеными углеродными волокнами (РУВ) и одновременно наполненных различными по природе нанотрубками (искусственные УНТ и природные ГНТ), при точечном трибоконтакте при комнатной температуре испытаний  $T=23$  °С.

Показано, что при точечном трибоконтакте в металло-полимерной паре трения максимальной износостойкостью обладает нанокompозит ПЭИ/10РУВ/1ГНТ, что также исключает микроабразивное изнашивание (повреждение) стального контртела ( $R_a = 0,02$  мкм). Указанный эффект достигается за счет формирования трибослоя по механизму ползучести и перемешивания, экранирующего сопрягаемые компоненты пары трения. Указанный трибослой нельзя считать антифрикционным, поскольку он не обеспечивает существенное снижение коэффициента трения ( $CoF \sim 0,24$ ), но существенно повышает сопротивление изнашиванию.

По совокупности более высокой технологичности и меньшей стоимости нанокompозит на основе ПЭИ с наполнением РУВ и ГНТ рекомендуется для практического использования для изготовления компонентов металло-полимерных узлов трения, в том числе работающих в условиях дефицита смазочной среды при точечном и линейном трибоконтактах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0010.

## Библиографический список

1. Panin S. V., Alexenko V. O., Buslovich D. G. High Performance Polymer Composites: A Role of Transfer Films in Ensuring Tribological Properties—A Review // *Polymers*. 2022. № 14, 975. Doi: 10.3390/polym14050975
2. Friedrich K., Schlarb A. *Tribology of Polymeric Nanocomposites. Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 832 p.
3. Chen S., Lu X., Wang T. [et al.]. Preparation and Characterization of Mechanically and Thermally Enhanced Polyimide/Reactive Halloysite Nanotubes Nanocomposites // *Journal of Polymer Research*. 2015. № 22, Is. 9. P. 185. Doi: 10.1007/s10965-015-0806-3.
4. Song K., Rubner M. F., Cohen R. E., Askar K. A. Polymer/Halloysite Nanotubes Composites: Mechanical Robustness and Optical Transmittance // *MRS Advances*. 2017. № 2. С. 27–32. Doi: 10.1557/adv.2016.629.

*Дата поступления статьи: 28.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 09.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. О. Алексенко, Д. Г. Буслович, Ц. Ло, С. В. Панин, 2023

Г. А. Болякно<sup>1</sup>, В. С. Ковивчак<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский научный центр СО РАН, г. Омск, Россия

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ХЛОРИРОВАННЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН

**Аннотация.** Исследовано воздействие мощного ионного пучка на хлорированный полиэтилен – чистый и с добавкой ферроцена  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ . Приведены данные об изменении морфологии и элементного состава поверхностного слоя полимера после воздействия мощного ионного пучка. Рассмотрены возможные физико-химические процессы, происходящие в поверхностном слое при таком облучении.

**Ключевые слова:** хлорированный полиэтилен, мощный ионный пучок, дегидрохлорирование, углеродный слой.

### I. Введение

Полимерные материалы применяются в промышленности в широком спектре задач из-за своих хороших диэлектрических свойств. При этом потенциал их применения еще до конца не определен. Модификация поверхностных свойств полимеров при воздействии импульсных потоков заряженных частиц представляет большой фундаментальный и практический интерес. В последние годы активно ведутся исследования по формированию на поверхности ряда полимеров слоя наноструктурированного углерода для применения в микроэлектронных устройствах. Одним из перспективных материалов для такого применения является хлорированный полиэтилен (ХПЭ). Поэтому исследование воздействия импульсного ионного излучения на такой полимер с целью изучения возможности формирования на его поверхности тонких углеродных слоев представляет большой интерес.

Образование углеродных структур из полимерных материалов (прежде всего хлорполимеров) может происходить разными способами, но наиболее простой способ – это термическое воздействие на полимер. В результате термической обработки происходит разрушение полимерной цепи и выделяются газообразные продукты разрушения, прежде всего  $\text{Cl}$ ,  $\text{HCl}$ . В результате полимер трансформируется в углеродсодержащий остаток, который при дальнейшей термообработке можно превратить в углерод. Было разработано много методик получения углерода из полимерных материалов, основанных на этом принципе.

Так, к примеру, в качестве источника термического воздействия [1] было использовано микроволновое излучение. В сравнении с дегидрохлорированием поливинилхлорида (ПВХ) при стационарной термической обработке, при использовании микроволнового излучения критическая температура, при которой начинается разложение полимерной цепи, была ниже. Было установлено, что после 100 минут степень дегидрохлорирования составила  $>50\%$  от массы полимера. Энергия активации при микроволновом облучении составила  $140 \pm 20$  кДж/моль<sup>-1</sup>, тогда как при стационарной термической обработке она была определена как  $290 \pm 30$  кДж/моль<sup>-1</sup>. Дополнительно было определено, что при одной и той же температуре степень дегидрохлорирования при воздействии микроволновым излучением гораздо выше, чем при термической обработке.

Формирование слоев наноструктурированного углерода на поверхности полимерных материалов может происходить только при использовании импульсного термического воздействия, например, импульсного лазерного излучения [2], импульсного ионного пучка [3]. Так, при воздействии мощного ионного пучка (МИП) наносекундной

длительности на хлорированный поливинилхлорид (ХПВХ), содержащий добавку ферроцена ( $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ), на его поверхности формируются углеродные нановолокна [4].

Воздействие МИП на тонкие слои ХПЭ (чистого или с добавкой ферроцена), вероятно, должно иметь свои особенности, связанные с отличием его строения и термодинамических свойств от ХПВХ.

## II. Результаты и обсуждение

В работе исследованы слои полимера, нанесенные на стеклянные подложки из раствора чистого ХПЭ (или с добавкой ферроцена) в тетрагидрофуране. Облучение образцов проводилось на ускорителе «Темп» пучком ионов ( $70\% \text{C}^+$  и  $30\% \text{H}^+$ ) с энергией  $E \approx 200 \text{ кэВ}$ , длительностью  $\tau = 60 \text{ нс}$ , в диапазоне плотностей тока  $20\text{--}150 \text{ А/см}^2$ . Оценочные значения пробегов используемых в эксперименте ионов в ХПЭ составляют около  $0,7 \text{ мкм}$  для ионов углерода и около  $4 \text{ мкм}$  для протонов. Морфология поверхности исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-6610LV, JEOL с энергодисперсионным анализатором Inca-350.

На рис. 1а представлено изображение поверхности ХПЭ до облучения. Поверхность необлученного чистого ХПЭ практически не отличается от поверхности необлученного ХПЭ с добавкой ферроцена. Воздействие МИП на слои чистого ХПЭ приводит к визуально наблюдаемому увеличению рассеяния света этой поверхностью.

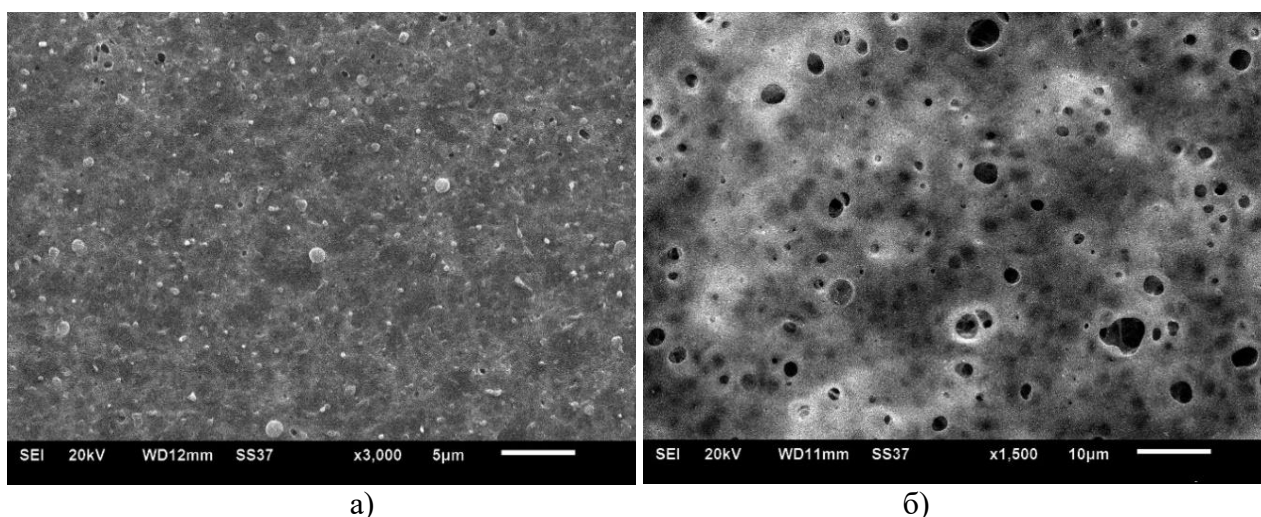


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности ХПЭ (а) до и (б) после воздействия МИП

На рис.1б представлено изображение поверхности чистого ХПЭ после облучения МИП с плотностью тока  $150 \text{ А/см}^2$ . При сравнении с морфологией образца до облучения можно заметить наличие множества пор в поверхностном слое. Они образуются вследствие радиационно-термического разложения приповерхностного слоя полимера и образования газообразных продуктов разложения. При выходе этих продуктов из этого слоя образуются открытые поры.

На образце ХПЭ с добавкой ферроцена морфология поверхности после облучения существенно отличается. Визуально это проявляется в почернении поверхности облученного полимера. На СЭМ изображении поверхности видно наличие волокон средним диаметром  $2,5 \text{ мкм}$  различной длины уже после 1 импульса (рис. 2а). Волокна пересекаются, образуя сложные ветвистые структуры. При увеличении числа импульсов до 5 (рис. 2б) средний диаметр волокон уменьшается до  $1,5 \text{ мкм}$ , волокна сохраняют свою ветвистость, хотя их общее количество уменьшилось.



Можно предположить, что катализатором роста углеродных волокон являются наночастицы железа, полученные при термическом разложении ферроцена.

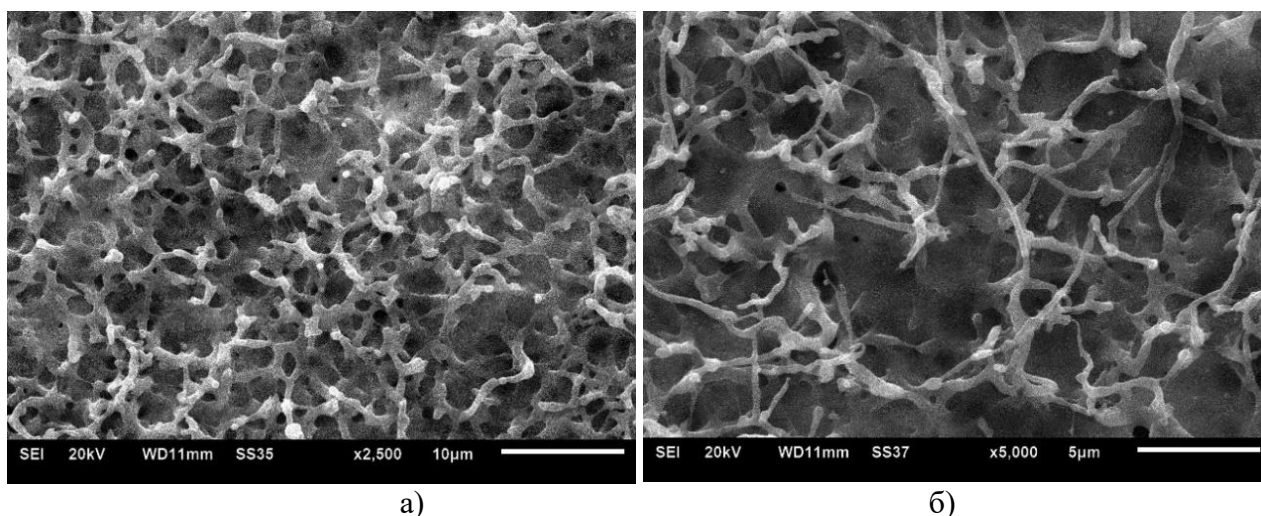


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности ХПЭ с ферроценом, облученного МИП: 1 импульсом (а) и 5 импульсами (б)

### III. Заключение

Воздействие мощного ионного пучка на хлорированный полиэтилен с добавкой ферроцена приводит к образованию на поверхности полимера углеродного слоя, содержащего волокна различных размеров. Установлено, что на формирование такой морфологии влияет добавка ферроцена, стимулирующая дегидрохлорирование поверхностного слоя ХПЭ. При этом механизм влияния ферроцена на формирование углеродных волокон еще до конца не изучен. Предположительно, частицы железа, образующиеся при терморазложении ферроцена, являются катализаторами роста волокон, независимо от природы используемого хлорполимера. Изучение влияния пучков заряженных частиц (например, импульсного ионного пучка) на поверхностную морфологию хлорполимеров имеет огромное значение для формирования гибких полимерных слоев с тонким поверхностным углеродным слоем, необходимых для производства гибких электронных компонентов.

### Благодарности

При выполнении работы было использовано оборудование Омского регионального центра коллективного пользования СО РАН. Работа частично выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 121121700062-3).

### Библиографический список

1. Kobayashi J., Hori M., Kobayashi N. [et al.]. Selective Dechlorination of Polyvinyl Chloride by Microwave Irradiation // Journal of Chemical Engineering of Japan. 2019. Vol. 52, no. 7. P. 656–661. Doi: 10.1252/jcej.18we219.
2. Lin J., Peng Z., Liu Y. [et al.]. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // Nature Communications. 2014. Vol. 5, no. 1. P. 5714. Doi:10.1038/ncomms6714.
3. Ковивчак В. С., Кряжев Ю. Г., Запелалова Е. С. Формирование наноструктурированного углеродного материала на поверхности полимера, содержащего ферроцен, при воздействии мощного ионного пучка // Письма в журнал технической физики 2016. Т.42. №. 3. С. 84–90.

4. Kovivchak V. S., Kryazhev Y. G., Trenikhin M. V. [et al.]. Ultrafast catalytic synthesis of carbon nanofibers on a surface of commercial chlorinated polymers under the action of a high-power ion beam of nanosecond duration // Applied Surfaces Science. 2018. Vol.448. P.642–645. Doi: 10.1016/j.apsusc.2018.04.093

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 07.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Г. А. Болякно, В. С. Ковивчак, 2023

УДК 004.942

*Д. Н. Бухаров*

Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУР ДИОКСИДА ТИТАНА**

**Аннотация.** Предложена модель геликоидальных структур, применимая для образцов микроструктур диоксида титана. В качестве модельного приближения используется диффузионная модель, реализованная методом клеточного автомата в рамках окрестности Мура, с учетом генерации от спиральной структуры. Погрешность моделирования не превосходит 10%, что говорит о достаточной адекватности модели.

**Ключевые слова:** геликоидальные структуры, диффузионная модель, клеточный автомат.

### **I. Введение**

Микроструктуры на основе диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) находят широкую перспективу для применения как инновационная элементная база современной электроники и фотоники. Эта перспектива обусловлена проявлением новых полезных особенностей при переходе на микроуровень [1]. Например, для электроники перспективно явление того, что степень окисления влияет на тип электропроводимости образцов микроструктур, когда он может меняться от металлического к полупроводниковому и наоборот [1]. Кроме этого, для приложений фотоники перспективно поверхностное строение таких структур, когда у них локализуется большая концентрация дефектов, обуславливающая высокую степень преломления поверхности образца [1].

В связи с этим интерес представляет задача разработки метода синтеза микроструктур  $\text{TiO}_2$  с требуемыми электрофизическими и оптическими свойствами. Для решения такой задачи в первом приближении удобно применять метод математического моделирования, позволяющий получить расчетные структуры первого приближения и на их основе проводить уточнение параметров реальных экспериментов.

### **II. Постановка задачи**

Анализ литературы и исследование образцов, полученных нашей научной группой в реальных экспериментах по синтезу образцов микроструктур  $\text{TiO}_2$  [2], свидетельствуют о том, что полученные образцы обладают рельефом, формируемым системой геликоидальных (винтовых) колонн, закрученных произвольным образом [3] с диаметром, не превосходящим



4,5 мкм. Проведенные исследования по синтезу образцов методом лазерной абляции тонкой пленки титана с последующим сворачиванием ее в магнитном поле позволяют предположить, что одним из определяющих процессов, оказывающих влияние на результирующую структуру, является тепловая диффузия. В связи с этим для описания модели таких структур выбиралась модель в диффузионном приближении.

### III. Описание модели

Диффузионная модель геликоидальной структуры формировалась на основе решения уравнения диффузии в дискретной области с помощью техники клеточного автомата [4]. Структура синтезировалась в итерационном процессе от стартовой фигуры, когда рассматриваемая ячейка расчетной области становилась оккупированной с заданной вероятностью при наличии уже занятой соседней с ней области в рамках окрестности соседства Мура, когда рассматриваются 8 соседних ячеек (рис. 1). Основным параметром модели явилась вероятность ячейки быть занятой. Этот относительный модельный параметр может быть соотнесен с физическим параметром системы – напряженностью магнитного поля.

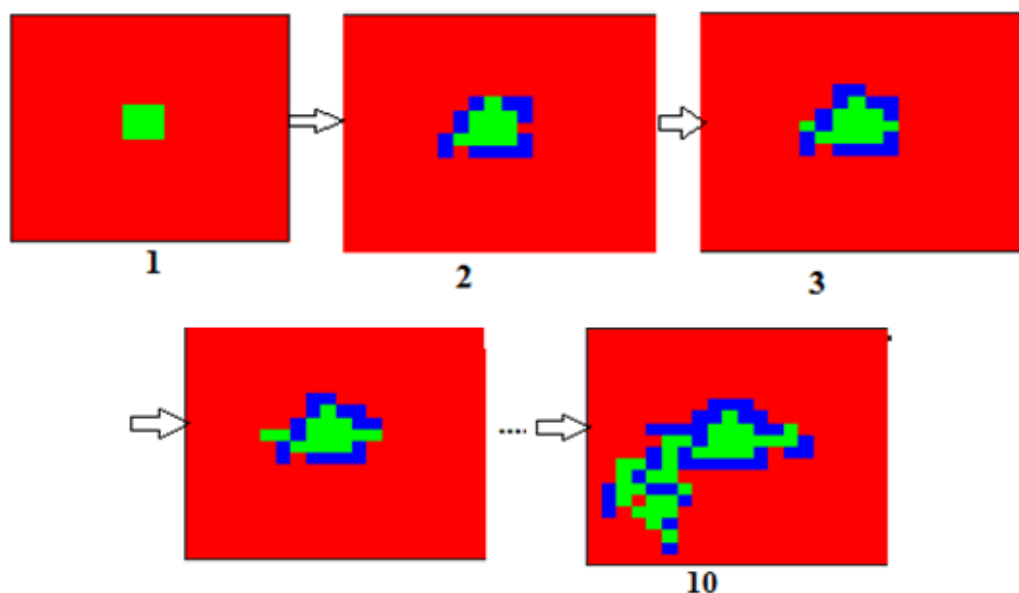


Рис. 1. Схема модели: результирующая структура после 1–10 итераций

### IV. Результаты моделирования

Диффузионная модель на основе клеточного автомата была реализована в среде MATLAB на квадратной расчетной области с длиной стороны размером 450 отн. ед., что соответствовало максимальному диаметру колонн микроструктур  $\text{TiO}_2$ . Вероятность ячейки быть занятой полагалась равной 0,5, что соответствовало напряженности магнитного поля 100 эрстед, используемой при экспериментальном синтезе образцов микроструктур  $\text{TiO}_2$  [2]. По предложенной модели были произведены расчеты геликоидальных структур. Для учета их геликоидальности в качестве стартовой структуры, от которой производился рост, рассматривалась спираль. В расчетах варьировалась форма образующих структуру элементов. Итоговая фигура формировалась из единичных элементов и из горизонтальных, вертикальных и диагональных цепочек из двух и четырех элементов (рис 2).

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными образцами [4] показало соответствие на качественном уровне. А количественная оценка погрешности модели не превышала величину 10%, что свидетельствует об удовлетворительной адекватности модели.

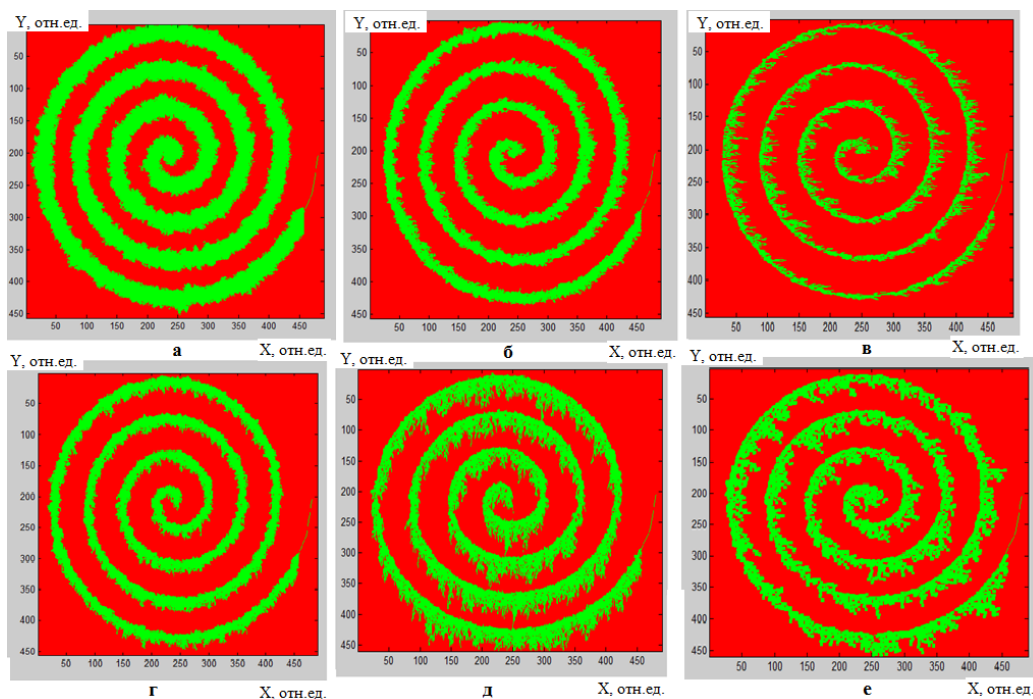


Рис. 2. Модели геликоидальных структур:  
 структура из единичных элементов (а), из горизонтальных линий длины два (б), четыре (в),  
 вертикальных линий длины два (г), четыре (д), диагональных линий длины 4 (е)

## В. Заключение

Предложенная модель в первом приближении достаточно адекватно описывает результаты исследований структуры полученных экспериментально образцов. Таким образом, диффузионное приближение может быть применимо для описания геометрических особенностей геликоидальных микроструктур диоксида титана.

Научный руководитель: Аракелян Сергей Мартиросович, Владимирский государственный университет.

## Библиографический список

1. Кавченков А. С. Диоксид титана в оптоэлектронных приложениях // European science. 2016. № 2 (12). С. 11–12.
2. Bukharov D. N., Skryabin I. O., Arakelyan S. M. Model of the microscroll structure // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1331. P. 012019.
3. Тимощенко И. А. Прохождение света через скульптурные геликоидальные пленки и периодические структуры на их основе // Сборник работ 60-й науч. конф. студентов и аспирантов Белгосуниверситета, 14–16 мая 2003 г. Минск, 2003. Ч. 1. С. 224–226.
4. Kulagin A. E., Shapovalov A. V. Analytical Description of the Diffusion in a Cellular Automaton with the Margolus Neighbourhood in Terms of the Two-Dimensional Markov Chain. // Mathematics 2023. Vol. 11 (3). no. 584. <https://doi.org/10.3390/math11030584>.

Дата поступления статьи: 27.03.23

Дата одобрения после рецензирования: 11.04.23

Дата принятия к публикации: 19.06.23

© Д. Н. Бухаров, 2023

*А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов, А. В. Оконешникова, И. С. Макаров*  
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

## **ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ С КОМБИНИРОВАННЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ**

**Аннотация.** В работе проведены исследования влияния комплексных наполнителей (сульфенамид Ц, сера, оксид цинка, оксид магния) на триботехнические свойства СВМПЭ. Показано, что композиты с оксидом магния при содержании 0,5 мас.% характеризуются улучшенной износостойкостью по сравнению с полимерной матрицей и композитами с оксидом цинка. Поверхность трения композитов исследовали методом ИК-спектроскопии, с помощью которого выявлено протекание окислительных процессов в результате трения.

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полимерный композиционный материал, сульфенамид Ц, оксид цинка, оксид магния.

### **I. Введение**

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) представляет собой превосходный конструкционный полимер с высокими физико-механическими характеристиками и отличными антифрикционными свойствами [1]. Кроме того, СВМПЭ обладает относительно высокой ударной стойкостью, а также высокой химической стойкостью и огнестойкостью [2]. Благодаря легкому весу и высокой термической стабильности, СВМПЭ пригоден в качестве трибоматериала для замены металлов или керамики [3]. Однако механические и триботехнические свойства СВМПЭ должны быть улучшены, чтобы соответствовать возрастающим требованиям в современном машиностроении.

Для улучшения физико-механических и триботехнических характеристик СВМПЭ были предложены различные подходы, включая смешивание с другими полимерами, включение нанонаполнителей, волокнистых тканей и т. д. [4]. Однако существует проблема усиления межфазного взаимодействия в полимерных композитах между неорганическими компонентами и органической неполярной полимерной матрицей [5]. Для решения данной задачи в настоящее время используют компатибилизаторы, поверхностно-активные соединения, аппреты и другие модификаторы твердых наполнителей для лучшего совмещения с полимерной матрицей. Одним из подходов создания высокопрочных композиционных материалов на основе СВМПЭ является применение гетероциклических реакционноспособных соединений (меркаптобензотиазол, тетраметилтиурамдисульфид, дифенилгуанидин) для усиления адгезионного взаимодействия между СВМПЭ и неорганическими наполнителями (оксидами металлов). Соединения меркаптобензотиазол, тетраметилтиурамдисульфид, дифенилгуанидин используются в качестве ускорителей вулканизации благодаря своим химическим свойствам инициировать реакции с радикальным механизмом. Данные органические соединения из-за высокой химической активности потенциально могут взаимодействовать с полимерной матрицей и тем самым повышать ее совместимость с неорганическими наполнителями.

Цель работы – исследование триботехнических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе СВМПЭ с комбинированными наполнителями (сульфенамид Ц, сера, оксид цинка, оксид магния).

## II. Материалы и методика исследований

В качестве полимерной матрицы использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4022 производства фирмы Celanese (Китай) с молекулярной массой 5 млн г/моль и со средним размером частиц 155 мкм. В качестве наполнителей использовали компоненты, применяемые для вулканизации резины, такие как: сульфенамид Ц (далее CBS) (ТУ 113-03-469-80,  $T_{пл}=98,2$  °С); сера молотая (далее S) (ГОСТ 127.4-93); оксид магния (MgO) (ГОСТ 4526-75) и оксид цинка (ZnO) (ГОСТ 10262-73).

Смешение компонентов ПКМ осуществлялось в лопастном смесителе при скорости вращения ротора 1200 об/мин. Композиционную смесь перерабатывали методом горячего прессования на гидравлическом прессе ПКМВ-100 («Импульс», Россия) при температуре 175 °С и давлении 10 МПа в течение 20 мин с последующим охлаждением до 80 °С под давлением. Изготавливали цилиндрические образцы с диаметром  $9,80 \pm 0,05$  мм и высотой  $20,0 \pm 1,0$  мм.

Для определения трибологических свойств ПКМ использовался трибометр УМТ-3 (SETR, США). Испытания проводились в следующих условиях: удельная нагрузка 1,9 МПа, скорость скольжения 0,5 м/с, схема трения «палец–диск», время испытания 3 ч. В качестве контртела выступает стальной диск из стали 45 с твердостью 45–50 HRC и шероховатостью  $R_a=0,06-0,08$  мкм. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139-69. Массы ПКМ до и после изнашивания измеряли на аналитических весах «Discovery DV215CD» («ОНАУС», Швейцария) с точностью до 0,00001 г.

## III. Результаты и их обсуждение

Результаты исследований триботехнических свойств и плотности СВМПЭ и ПКМ с комплексными наполнителями приведены в табл. 1.

Таблица 1

Трибологические свойства и плотность ПКМ

Композит	$f$	I, мг/ч	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Исходный СВМПЭ	$0,38 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	$0,93 \pm 0,01$
СВМПЭ + 0,5 мас.% (CBS, S и ZnO)	$0,39 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,02$	$0,95 \pm 0,01$
СВМПЭ + 1,0 мас.% (CBS, S и ZnO)	$0,42 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,03$	$0,96 \pm 0,02$
СВМПЭ + 0,5 мас.% (CBS, S и MgO)	$0,39 \pm 0,02$	$0,08 \pm 0,02$	$0,94 \pm 0,01$
СВМПЭ + 1,0 мас.% (CBS, S и MgO)	$0,39 \pm 0,02$	$0,13 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,01$

где  $f$  – коэффициент трения, I – скорость массового изнашивания,  $\rho$  – плотность.

Из табл. 1 видно, что коэффициент трения во всех образцах ПКМ показал схожие результаты по сравнению с исходным СВМПЭ. В композитах с содержанием оксида цинка в количестве 0,5 мас.% скорость массового изнашивания снижается на ~16% по сравнению с исходным СВМПЭ. В то же время при увеличении наполнителей в количестве до 1 мас.% CBS, S и ZnO происходит повышение скорости массового изнашивания на 50% относительно исходного СВМПЭ. Введение комплексных наполнителей с оксидом магния в СВМПЭ приводит к снижению скорости массового изнашивания на ~33%, при дальнейшем увеличении содержания наполнителей до 1 мас.% данный показатель достигает значений исходного полимера.

Введение комплексных модификаторов совместно с оксидами магния и цинка приводит к некоторому повышению плотности ПКМ, что согласуется с увеличением удельной массы композита при введении неорганических частиц. Так, плотность ПКМ с 1 мас.% содержанием комплекса с оксидом цинка имеет значение  $0,96$  г/см<sup>3</sup>, при этом композит характеризуется некоторым увеличением скорости массового изнашивания.

Проведена ИК-спектроскопия поверхностей трения СВМПЭ и композитов в зависимости от состава и содержания наполнителей, результаты приведены на рис. 1. ИК-

спектр исходного СВМПЭ характеризуется наличием сильных полос поглощения в областях 2900, 2845, 1480 и 720  $\text{см}^{-1}$ , вызванных валентными и деформационными колебаниями  $-\text{CH}_2$  связей и маятниковыми колебаниями полимерной цепи [6]. После трения на поверхности СВМПЭ были выявлены новые полосы, относящиеся к поглощению кислородсодержащих групп. В связи с этим в дальнейшем было целесообразно рассмотреть ИК-спектры в диапазоне 2500–500  $\text{см}^{-1}$ .

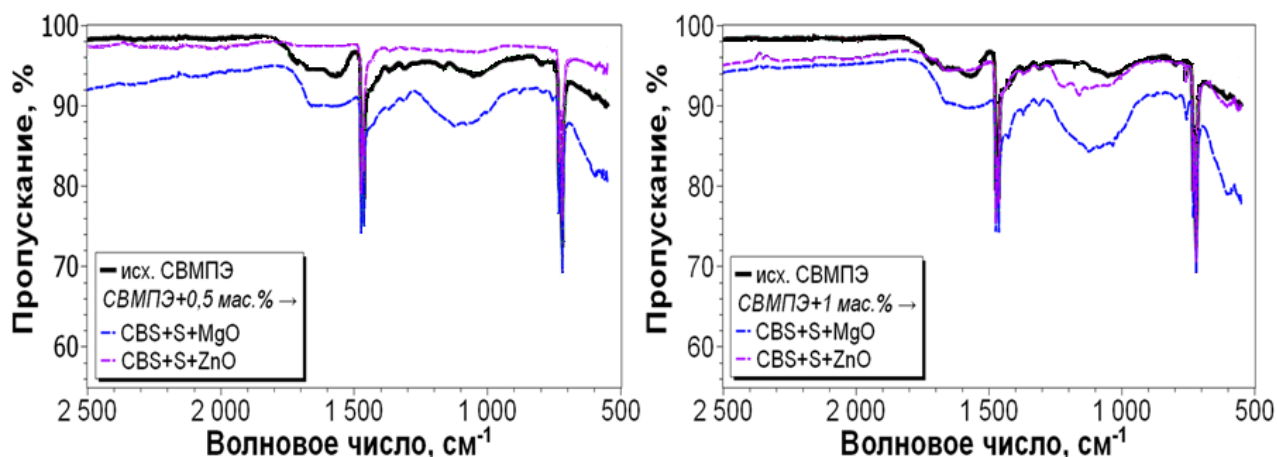


Рис. 1. ИК-спектры поверхностей трения СВМПЭ и композитов в зависимости от содержания наполнителей

В ИК-спектрах поверхности трения ПКМ наблюдается наличие полос поглощения в области 1510–1770  $\text{см}^{-1}$ , относящихся к колебаниям карбонильных и карбоксильных соединений. В ИК-спектрах композитов с оксидом цинка снижается интенсивность полос поглощения кислородсодержащих групп, кроме того, появляются слабые пики при 754, 1012, 1238 и 1313  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие колебаниям связей органического модификатора. Некоторое повышение интенсивности пиков и появление новых полос поглощения в области 920–1270  $\text{см}^{-1}$  (колебания С-О связи в спиртах и в эфире) наблюдаются в ИК-спектре композита с комбинированным наполнителем с MgO, что свидетельствует об интенсификации трибоокислительных процессов [7].

#### IV. Заключение

Триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ с комплексными наполнителями (CBS, S, ZnO и MgO) были оценены с использованием механизма трения типа «палец–диск» при сухом трении в зависимости от состава и содержания наполнителей. Результаты исследований показали, что композит с содержанием MgO (при содержании 0,5 мас.%) имеет на ~33% более низкую скорость массового изнашивания и коэффициент трения на уровне ненаполненного полимера в условиях сухого трения. Методом ИК-спектроскопии показано, что данный композит слабо подвергается окислительным процессам в результате трения. Эти результаты согласуются с ранее проведенными работами. В дальнейшем интерес вызывает исследование других видов оксидов с использованием органических модификаторов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-73-00076, <https://rscf.ru/project/22-73-00076>.

#### Библиографический список

1. Кахраманов Н. Т., Гулиев А. Д., Аллахвердиева Х. В. Состояние проблемы получения и исследования структуры и свойств нанокompозитов на основе полиолефинов и

минеральных наполнителей // Пластические массы. 2022. Т. 1, №. 11–12. С. 46–52.

2. Чурилов Г. Н., Внуков Г. Н., Селютин Г. Е. [и др.]. Получение и исследование композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и WO<sub>3</sub> // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, №. 4. С. 813.

3. Данилова С. Н., Ярусова С. Б., Буравлев И. Ю. [и др.]. Модифицирование СВМПЭ волластонитом, синтезированным из отходов борного производства // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, №. 1. С. 71–82.

4. Селютин Г. Е., Гаврилов Ю. Ю., Воскресенская Е. Н. [и др.]. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18. №. 3. С. 375–388.

5. Яновский Ю. Г., Козлов Г. В., Карнет Ю. Н. Фрактальное описание значимых наноэффектов в среде полимерных композитов с наноразмерными наполнителями. Агрегация, межфазные взаимодействия, усиление // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №. 6. С. 21–34.

6. Danilova S. N., Yarusova S. B., Kulchin Y. N. [et al.]. UHMWPE/CaSiO<sub>3</sub> nanocomposite: Mechanical and tribological properties // Polymers. 2021. Vol. 13. No. 4. P. 570. Doi: 10.3390/polym13040570.

7. Валуева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 49–57. Doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57.

*Дата поступления статьи: 03.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 15.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Л. А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов, А. В. Оконешникова, И. С. Макаров, 2023

УДК 621.592.0

*А. В. Вербицкий<sup>1</sup>, А. А. Теплоухов<sup>1</sup>, Н. А. Семенюк<sup>1</sup>, С. А. Сычёв<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный университет, г. Омск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА С КОБАЛЬТОВОЙ СВЯЗКОЙ**

**Аннотация.** Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения механических характеристик твердосплавных пластин ленточнопильного станка GALACTIC. Целью работы является установление влияния лазерного воздействия на морфологию поверхности и микротвердость твердосплавных пластин. Для улучшения прочностных характеристик WC-Co использовалось лазерное воздействие с энергией импульса 250 мДж, 400 мДж и 1020 мДж. Установлено, что после лазерного воздействия микротвёрдость образцов при энергии импульса лазера 250 мДж практически не изменилась, при значении 400 мДж увеличилась на 11%, при значении 1020 мДж увеличивается на 18% по отношению к образцу без лазерного воздействия.

**Ключевые слова:** лазерное воздействие, твердосплавные пластины, микротвёрдость, структура поверхности.

## I. Введение

Современные заводы по производству металлоконструкций широко применяют для раскроя металла вертикальные ленточнопильные станки GALACTIC с использованием пил из стали марки 45ХГНМФА с твердостью порядка 493 HV, а также импортных пил из стали марки 10P2M10K8 с твердостью порядка 820 HV. В процессе работы станка для зажима боковой поверхности используемых пил применяются твердосплавные пластины на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой (WC-Co). Поверхность этих пластин подвергается постоянному воздействию со стороны полотна пилы. Такое воздействие на поверхность твердосплавных пластин вызывает их изнашивание, потерю размера и формы. В дальнейшем использование таких пластин приводит к скручиванию полотна во время реза и, соответственно, появлению неустраняемого брака [1, 2]. Один из способов уменьшения износа и увеличения срока службы твердосплавных пластин на основе WC-Co – повышение микротвердости поверхности данного материала. Поверхностное модифицирование материалов лазерным воздействием для улучшения эксплуатационных характеристик выступает в качестве альтернативы восстановлению элементов [3], поэтому целью данной работы является установление влияния лазерного воздействия на морфологию поверхности и микротвердость твердосплавных пластин на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой (WC-Co).

## II. Методика эксперимента

Исследованию подвергались твердосплавные пластины на основе WC-Co до и после лазерного воздействия. Для обеспечения чистоты исследуемой поверхности образцы были подвергнуты обработке спиртовым раствором в ультразвуковой ванне. Воздействие на поверхность производилось энергиями импульса 250 мДж, 400 мДж, 1020 мДж твердотельным наносекундным лазером с Nd:YAG стержнем с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 16 нс.

Микроструктуру стали и элементный состав исследовали с помощью растрового электронного микроскопа JEOL-5700 и приставки энергодисперсионного анализа ЭДА. Измерения проводились в режиме высокого вакуума, при ускоряющем напряжении 20 кВ. Микротвердость образцов измерялась по методу Виккерса.

## III. Результаты экспериментов

Микрофотографии образцов до и после лазерного воздействия представлены на рис. 1.

Элементный состав пластин на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой (WC-Co), полученный из энергограмм с помощью растрового электронного микроскопа JEOL-5700 и приставки энергодисперсионного анализа, представлен в таблице 1.

Таблица 1

**Элементный состав твердосплавных пластин**

Элементы	Без воздействия	Энергия импульса 250 мДж	Энергия импульса 400 мДж	Энергия импульса 1020 мДж
W	88,78	88,36	86,43	82,72
C	6,2	6,23	6,62	9,08
Co	3,85	4,02	5,43	6,3
O	1,17	1,39	1,52	1,9

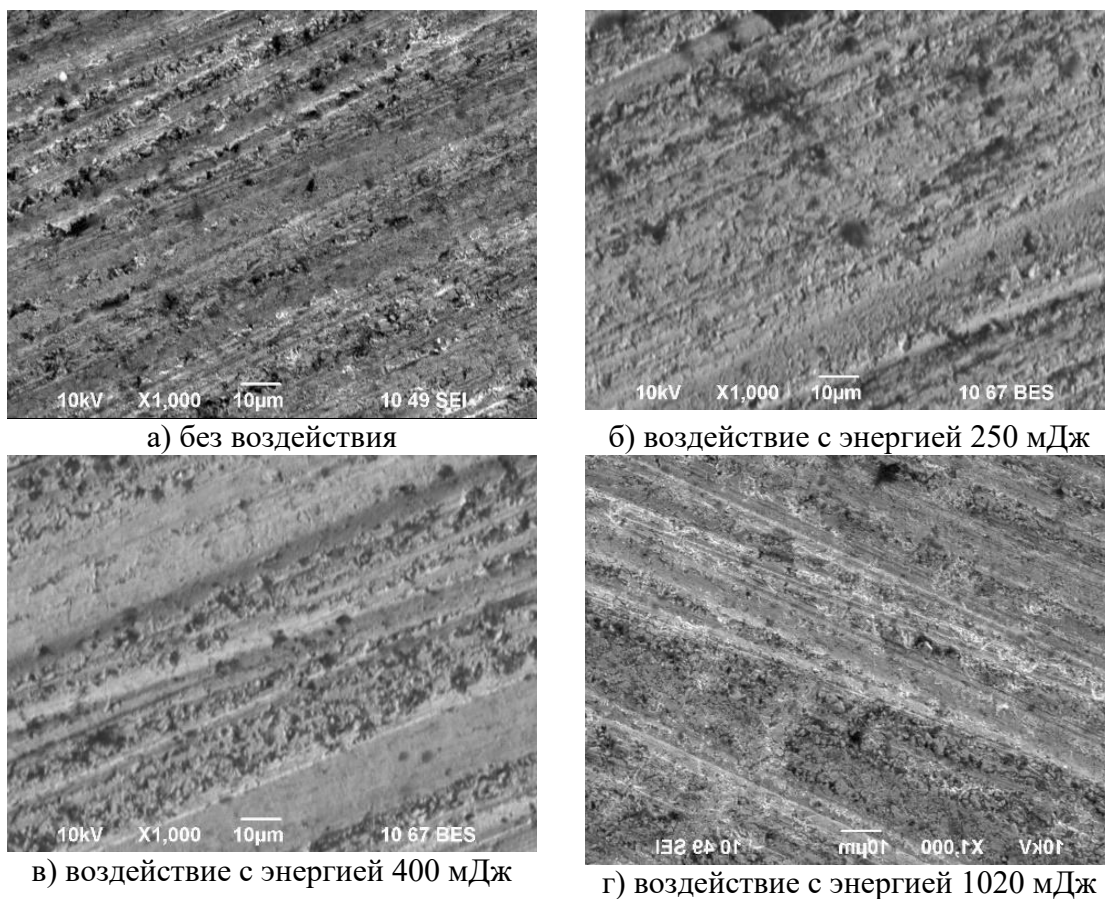


Рис. 1. Микрофотографии поверхности

Значение микротвердости образца до воздействия лазерного излучения представлено в таблице 2. Измерения проводились на поверхности твердосплавной пластины в нескольких точках на микротвердомере ПМТ-3.

Таблица 2

**Параметры микротвердости без воздействия**

Замеры	Значение твердости HV	Среднее значение
1	1375	1399
2	1402	
3	1377	
4	1441	

После воздействия лазерного излучения с энергией 250 мДж на поверхность твердосплавной пластины была измерена микротвердость в нескольких точках на микротвердомере. Полученные значения приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Параметры микротвердости с воздействием 250 мДж**

Замеры	Значение твердости HV	Среднее значение
1	1420	1418
2	1412	
3	1398	
4	1441	



После воздействия лазерного излучения с энергией 400 мДж на поверхность твёрдосплавной пластины была измерена микротвёрдость в нескольких точках на микротвердомере. Полученные значения приведены в таблице 4.

Таблица 4

**Параметры микротвердости с воздействием 400 мДж**

Замеры	Значение твердости HV	Среднее значение
1	1549	1556
	1533	
	1567	
	1576	

После воздействия лазерного излучения с энергией 1020 мДж на поверхность твёрдосплавной пластины была измерена микротвёрдость в нескольких точках на микротвердомере. Полученные значения приведены в таблице 5.

Таблица 5

**Параметры микротвердости с воздействием 1020 мДж**

Замеры	Значение твердости HV	Среднее значение
1	1622	1654
2	1678	
3	1619	
4	1697	

#### IV. Обсуждение результатов

Анализ микрофотографий поверхности образцов показал наличие на поверхности пор и трещин, связанных с производством твердосплавных изделий методом порошковой металлургии. Количество и размеры пор уменьшаются с ростом энергии импульса. При энергии импульса 1020 мДж трещины и поры после лазерного воздействия не наблюдаются.

Энергодисперсионный анализ твердосплавных пластин после лазерного воздействия показал увеличение количества кобальта с увеличением энергии импульса на поверхности по сравнению с образцом в исходном состоянии. Повышение доли кобальта после лазерного воздействия, согласно литературным данным, подтверждает повышение микротвердости и износостойкости.

#### V. Заключение

1. Установлено, что лазерное воздействие на пластины из карбида вольфрама с кобальтовой связкой (WC-Co) с энергией импульса 400 мДж повышает их микротвёрдость на 11%.

2. Повышение энергии импульса до 1020 мДж приводит к увеличению на 18% значения микротвёрдости по отношению к образцу без лазерного воздействия.

3. Лазерное воздействие при энергии импульса лазера 250 мДж практически не оказало воздействие на микротвердость пластин из карбида вольфрама с кобальтовой связкой (WC-Co).

#### Библиографический список

1. Феоктистов А. Е. Ленточнопильные станки. М.: Лесная промышленность, 1976. 152 с.
2. Литвинов А. Е., Корниенко В. Г., Сухонос Н. И. Исследование режимов резания на ленточнопильных станках // Станки. Инструмент (СТИН). 2010. № 10. С. 5–8.

3. Богодухов С. И., Козик Е. С., Свиденко Е. В. Влияние лазерного упрочнения на состояние поверхностных слоев твердого сплава Т15К6 // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т. 11. С. 636–640.

*Дата поступления статьи: 11.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 15.06.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. В. Вербицкий<sup>1</sup>, А. А. Теплоухов<sup>1</sup>, Н. А. Семенюк<sup>1</sup>, С. А. Сычёв<sup>2</sup>, 2023

УДК 661.888.1

*А. Д. Гусакова<sup>1</sup>, Ю. В. Кузнецова<sup>2</sup>, А. А. Мальцева<sup>1</sup>, О.С. Спасова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХОКИСИ ВАНАДИЯ

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования электросопротивления материалов на основе трехокиси ванадия, легированных железом с повышенной концентрацией кислорода  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3+Y}$  ( $Y=0; 0,01; 0,04; 0,08$ ). Установлено, что легирование трехокиси ванадия 2% железа сопровождается уменьшением скачка электросопротивления в 1,8 раз, а температура фазового перехода уменьшается до 162,2 К.

**Ключевые слова:** оксид ванадия, фазовый переход полупроводник-металл, электросопротивление.

### I. Введение

Трехокись ванадия ( $V_2O_3$ ) находит свое применение в температурных датчиках и термореле [1, 2], т. к. в окрестностях 170 К испытывает фазовый переход I рода (ФПМД), сопровождающийся изменением структурных параметров, электрических, магнитных и оптических свойств. Авторами работ [3–5] отмечается, что при незначительном замещении атомов ванадия атомами других переходных металлов (в частности, алюминия, железа), температура и величина скачка электросопротивления ФПМД может меняться. Однако недостаточно изученным остается вопрос о влиянии увеличения концентрации кислорода в материалах на основе трехокиси ванадия как на температуру фазового перехода, так и на другие параметры: ширину ФПМД, величину скачка электросопротивления фазового перехода. Поэтому основной целью данной работы является изучение электрических свойств материалов на основе трехокиси ванадия  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3+Y}$  (при  $Y=0,01; 0,04; 0,08$  –  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,01}; V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,04}; V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,08}$ ).

### II. Методы исследования

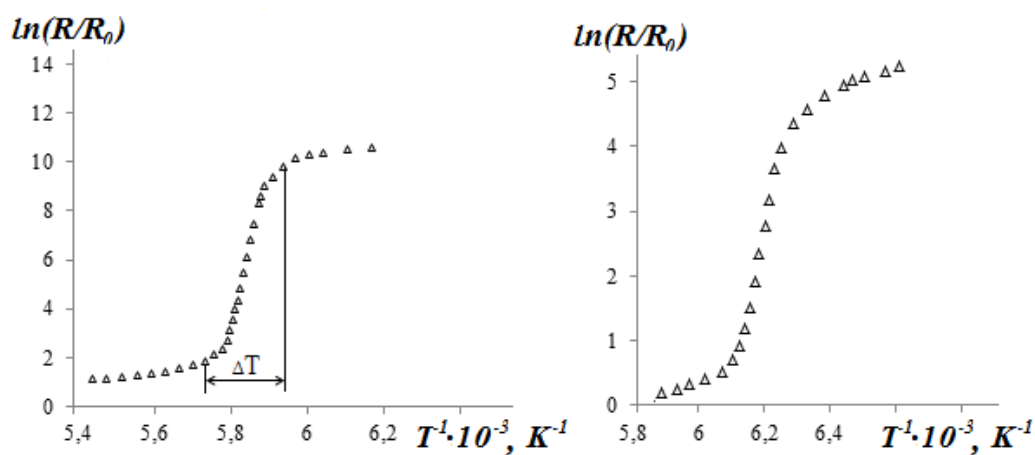
Для определения фазового состава использовался метод рентгеновского фазового анализа с относительной погрешностью не более 1 %. Было установлено, что для всех образцов при комнатной температуре структура соответствует гексагональной фазе  $\alpha$ - $V_2O_3$ .

Значения электросопротивления измерялись в режиме нагрева образцов при температурах в диапазоне от 100 К до 250 К стандартным двухконтактным методом с относительной погрешностью 6 %.

Температура образца регистрировалась платиновым термометром сопротивления, погрешность составила 1 %.

### III. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены зависимости  $\ln(R/R_0)=f(T)$  в области температур фазового перехода в режиме нагрева для  $V_2O_3$  (рис. 1а) и для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,01}$  (рис. 1б).  $R$  – сопротивление материала при текущей температуре  $T$ ,  $R_0$  – сопротивление материала при  $0^\circ C$ . Аналогичные зависимости были получены для материалов  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,04}$  и  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,08}$ . Температура ФПМД определялась по среднему значению при скачке электросопротивления.



а) для  $V_2O_3$

б) для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,01}$

Рис. 1. Температурная зависимость  $\ln(R/R_0)$

При легировании 2% железа наблюдается уменьшение температуры ФПМД с 169,7 К для  $V_2O_3$  до 162,1 для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,01}$ . Для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,04}$  температура ФПМД составила 161,9 К, для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,08}$  – 161,1 К. По графикам также определены температурные интервалы ФПМД  $\Delta T$  как разница температур между началом ФП и его окончанием (рис. 1а) и величина скачка электросопротивления при ФПМД  $\Delta \ln(R/R_0)$ . Параметры фазового перехода представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Параметры фазового перехода металл-диэлектрик**

Соединение	Параметры		
	T, К	$\Delta T$ , К	$\Delta \ln(R/R_0)$
$V_2O_3$	169,7	4,0	9,0
$V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,01}$	162,1	5,7	4,5
$V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,04}$	161,9	5,0	4,2
$V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,08}$	161,1	5	4,0

### III. Заключение

По результатам исследования температурных зависимостей электросопротивления материалов на основе трюоксида ванадия  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3+Y}$  ( $Y=0; 0,01; 0,04; 0,08$ ) установлены следующие результаты:

1. При легировании железом температура фазового перехода уменьшается на 4,5%. При увеличении концентрации кислорода для данных материалов температура ФПМД также уменьшается.

2. Установлено, что легирование 2% железом приводит к увеличению температурного интервала  $\Delta T$  при ФПМД. Данный интервал для  $V_2O_3$  составил 4 К, а для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,01}$  – 5,7 К. При увеличении концентрации кислорода ширина температурного интервала уменьшается и для  $V_{1,98}Fe_{0,02}O_{3,08}$  составляет 5 К.

3. Выявлено, что как легирование 2% железа, так и увеличение концентрации кислорода для  $V_2O_3$  приводит к уменьшению скачка электросопротивления при ФПМД, однако фазовый переход сохраняется.

Научный руководитель: Семенюк Наталья Андреевна, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Мотт Н. Ф. Переходы металл-изолятор. М.: Наука, 1979. 342 с.
2. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
3. Суриков Вад. И., Суриков Вал. И., Семенюк Н. А. [и др.], Параметры электронного и фононного энергетических спектров в металлической фазе полупрозрачной окиси ванадия // Известия вузов. Физика. 2023. Т. 66, № 3(784). С. 126–130.
4. Trastoy J., Kalcheim Y., Valle J. D. [et al.]. Enhanced metal–insulator transition in  $V_2O_3$  by thermal quenching after growth // Electronic materials. 2018. Vol. 53, no. 12. P. 9131–9137.
5. Ishiwata Y., Takahashi E., Akashi K. [et al.]. Impurity-Induced First-Order Phase Transitions in Highly Crystalline  $V_2O_3$  Nanocrystals // Advanced materials interfaces. 2019. Vol. 2, no. 12. P. 1–6.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 22.05.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Д. Гусакова, Ю. В. Кузнецова, А. А. Мальцева, О.С. Спасова, 2023

УДК 54.057:691.175.2

*С. Н. Данилова<sup>1</sup>, С. Б. Ярусова<sup>2</sup>, П. С. Гордиенко<sup>2</sup>, А. А. Охлопкова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

### ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛЛАСТОНИТА ИГОЛЬЧАТОГО ГАБИТУСА В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРА СВМПЭ

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияние волластонита, синтезированного гидротермальным методом, на упруго-прочностные свойства полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Установлено, что частицы волластонита имеют игольчатую структуру. При введении в полимерную матрицу игольчатого волластонита наблюдается эффективное армирование композиционной системы,

характеризующееся повышением упруго-прочностных свойств. Разработанные полимерные композиционные материалы отличаются увеличением предела прочности при растяжении на 26% и модуля упругости на 60% относительно исходного полимера.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, волластонит, борогипс.

## I. Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), состоящие из полимерной матрицы и усиливающих наполнителей/модификаторов, находят широкое применение во всех отраслях жизнедеятельности человека [1]. При создании композиционных материалов существенное значение имеет выбор полимерной матрицы, от свойств которой зависят технические характеристики получаемого изделия и области применения. Среди класса полиолефинов можно выделить сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), который обладает оптимальными эксплуатационными свойствами. Так, СВМПЭ имеет высокие значения прочности, химической стойкости, износостойкости и низкий коэффициент трения. Однако использование СВМПЭ ограничено низкими значениями модуля упругости, поэтому требуется модификация полимерной матрицы введением наполнителей или использованием дополнительных технологических методов.

В последние годы наблюдается тенденция развития новых видов ПКМ, характеризующихся улучшенными функциональными свойствами, к числу которых можно отнести нанокompозиты. Применение наноразмерных наполнителей обусловлено их уникальными свойствами, к которым можно отнести высокую удельную поверхность [2]. Ключевым фактором, влияющим на конечные свойства ПКМ, является выбор вида нанонаполнителя и его концентрация в полимерной матрице, т.е. прогнозирование зависимости «состав–свойства» нанокompозита. Кроме того, надо учитывать природу, размер, форму и химический состав используемого нанонаполнителя. В данной работе предлагается использовать волластонит с игольчатым габитусом частиц, синтезированный гидротермальным методом, в качестве нанонаполнителя. Преимущество применения синтетического волластонита обусловлено возможностью варьирования размеров и формы его частиц.

В настоящее время для синтеза волластонита и сопутствующих промежуточных продуктов, в том числе гидросиликатов кальция, применяются различные низкотемпературные или высокотемпературные методы с последующей термической обработкой промежуточных соединений или путем прямых реакций. При этом в зависимости от метода, условий синтеза и исходных реагентов наблюдается формирование частиц волластонита различной морфологии. В свою очередь, свойства ПКМ будут зависеть от размера, морфологии и гранулометрического состава синтетических частиц. В работах [3, 4] показано, что волластонит, синтезированный гидротермальным методом в модельной системе и из техногенных отходов (борогипса), способствует повышению физико-механических и трибологических свойств ПКМ. Установлено [5, 6], что волластонит, синтезированный низкотемпературным методом, является эффективным модификатором, способствующим повышению модуля упругости и прочности при сжатии ПКМ.

Целью настоящей работы является исследование влияния волластонита на упруго-прочностные свойства нанокompозитов на основе СВМПЭ.

## II. Материалы и методы исследования

Полимерной матрицей выступает сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR-4022 (Celanese Corporation, Китай). В качестве нанонаполнителя использован синтетический волластонит стабильной модификации игольчатого габитуса. Волластонит был синтезирован в автоклаве компании Part Instrument (USA) 4848 при температуре обработки борогипса

220 °С в течение 3 ч, с последующим обжигом осадка в интервале температур 900–1000 °С в течение 1 ч.

Рентгенограммы получали с помощью автоматического дифрактометра D8 ADVANCE (Германия), а морфологию частиц волластонита исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-7800F (Jeol, Япония).

Порошок (гранулы) СВМПЭ и волластонит смешивали на лопастном смесителе при скорости вращения лопастей 1200 об/мин. Композиты получали методом горячего прессования при температуре 175 °С и давлении 20 МПа, при выдержке в течение 20 мин. Упруго-прочностные свойства композитов исследовали на разрывной машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония). Испытания на растяжение проводились согласно ГОСТ 11262 при скорости движения подвижных захватов 50 мм/мин. Модуль упругости при растяжении исследовали согласно ГОСТ 9550-51 при скорости движения захватов 0,5 мм/мин.

### III. Результаты и их обсуждение

Фазовый состав синтезированного образца характеризуется наличием волластонита  $\text{CaSiO}_3$  триклинной модификации с кристаллической решеткой:  $a=7,92580 \text{ \AA}$ ,  $b=7,32020 \text{ \AA}$ ,  $c=7,06530 \text{ \AA}$ ,  $\alpha=90,055^\circ$ ;  $\beta=95,217^\circ$ ;  $\gamma=103,426^\circ$ , а также ангидрида  $\text{CaSO}_4$  с орторомбической кристаллической решеткой с параметрами:  $a=6,99330 \text{ \AA}$ ,  $b=7,00170 \text{ \AA}$ ,  $c=6,24110 \text{ \AA}$ ,  $\alpha=90,000^\circ$ ;  $\beta=90,000^\circ$ ;  $\gamma=90,000^\circ$ . Анализ морфологии образцов (рис. 1) показал, что в процессе обжига формируются частицы волластонита игольчатой структуры с диаметром около ~100 нм и длиной от 1 до 8 мкм, которые образуют ассоциаты. Кроме того, на поверхностях иголок наблюдается наличие мелких вкраплений из частиц неправильной формы. Синтезированные частицы характеризуются удельной поверхностью, равной  $4,5 \text{ м}^2/\text{г}$ .

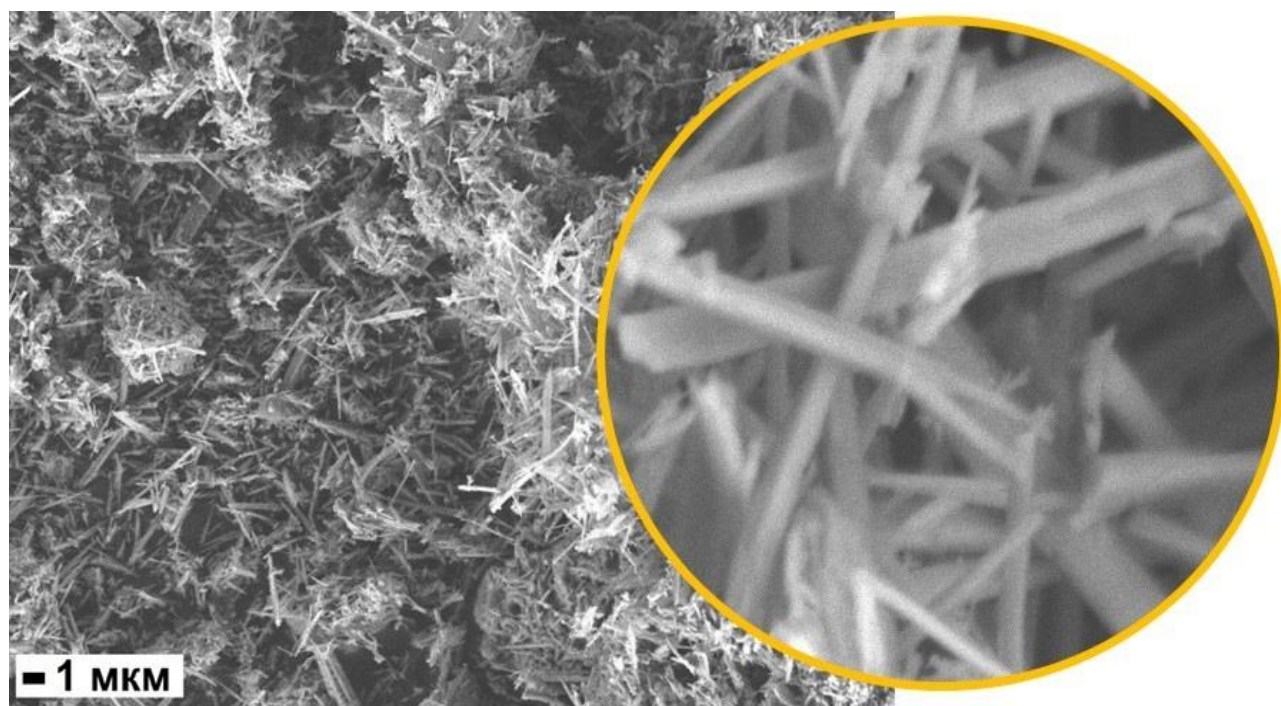


Рис. 1. СЭМ изображение частиц волластонита (при увеличении  $\times 3000$  и  $\times 30000$ )

Стабильная игольчатая структура волластонита предполагает хорошее армирующее действие на полимерную матрицу, при котором часть внешней нагрузки передается волокну. Использование армирующих наполнителей является перспективным способом улучшения упруго-прочностных показателей ПКМ. Результаты исследований упруго-прочностных свойств ПКМ представлены в табл. 1.

**Упруго-прочностные свойства СВМПЭ и ПКМ**

Полимер	Содержание волластонита, мас. %	$\epsilon_{pp}$ , %	$\sigma_{pm}$ , МПа	$E_p$ , МПа
СВМПЭ	0	311±18	34±2	420±25
	0,5	343±16	43±3	588±44
	1,0	359±17	42±2	592±41
	2,0	322±16	38±1	615±43
	5,0	321±11	37±1	671±18

Примечание:  $\epsilon_{pp}$ , % – относительное удлинение при разрыве;  $\sigma_{pm}$ , МПа – предел прочности при растяжении;  $E_p$ , МПа – модуль упругости при растяжении.

В результате проведенных исследований установлено, что введение 0,5–1,0 мас.% волластонита в ПКМ приводит к повышению относительного удлинения при разрыве на 15% и предела прочности при растяжении на 26% по сравнению с исходным СВМПЭ. С увеличением содержания волластонита наблюдается постепенное увеличение модуля упругости. Так, максимальное повышение на ~60% наблюдается при концентрации 5 мас.% волластонита в СВМПЭ. Повышение упруго-прочностных свойств ПКМ можно объяснить характером взаимодействия поверхности игольчатых частиц волластонита с полимерной матрицей. Известно [7], что игольчатые частицы волластонита обеспечивают дополнительную механическую адгезию с полимерной матрицей по сравнению с базальтовыми и углеродными волокнами. Это препятствует преждевременному отслаиванию в межфазной зоне при растяжении, за счет чего наблюдается равномерное перераспределение внешних нагрузок внутри композита. Таким образом, наблюдается дополнительное упрочнение композиционной системы, при этом непрерывная матрица легко передаёт прилагаемую нагрузку частицам второй фазы.

**IV. Заключение**

Таким образом, полученные результаты показывают эффективность применения волластонита со стабильной игольчатой структурой в качестве армирующего элемента в композиционных материалах. Установлено, что композиты характеризуются повышенными значениями предела прочности и модуля упругости при растяжении, что подтверждает эффект армирования волластонитовыми волокнами полимерной матрицы.

Автоклавный синтез и исследование частиц волластонита проводились на базе Института химии ДВО РАН (*гос. задание ИХ ДВО РАН № FWFN (0205)-2023-0002*). Исследования упруго-прочностных свойств СВМПЭ и композитов проводились с использованием оборудования Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSRG-2021-0016.

**Библиографический список**

1. Wang Y., Desroches G. J., Macfarlane R. J. Ordered polymer composite materials: challenges and opportunities // *Nanoscale*. 2021. Vol. 13, no. 2. P. 426–443. Doi:10.1039/D0NR07547G.
2. Njuguna J., Pielichowski K., Desai S. Nanofiller reinforced polymer nanocomposites // *Polymers for Advanced Technologies*. 2008. Vol. 19, no. 8. P. 947–959. Doi:10.1002/pat.1074.
3. Danilova S. N., Yarusova S. B., Kulchin Y. N. [et al.]. UHMWPE/CaSiO<sub>3</sub> nanocomposite: mechanical and tribological properties // *Polymers*. 2021. Vol. 13, no. 4. P. 570. Doi:10.3390/polym13040570.

4. Данилова С. Н., Ярусова С. Б., Буравлев И. Ю. [и др.]. Модифицирование СВМПЭ волластонитом, синтезированным из отходов борного производства // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, №1. С. 71–82. Doi:10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82.

5. Danilova S. N., Yarusova S. B., Lazareva N. N. [et al.]. A Study of the Wear Mechanism of Composites Modified with Silicate Filler // Ceramics. 2022. Vol. 5, no. 4. P. 731–747. Doi:10.3390/ceramics5040053.

6. Данилова С. Н., Ярусова С. Б., Охлопкова А. А. [и др.]. Волластонит, полученный в модельной системе  $\text{CaCl}_2\text{-Na}_2\text{SiO}_3\text{-H}_2\text{O}$ , как модификатор сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2023. Т. 66, № 1. С. 105–113. Doi:10.6060/ivkkt.20236601.6681.

7. Алексенко В. О. Износостойкие композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с армирующими волокнами для полимер-металлических трибосопряжений в машиностроении: дисс. ... канд. тех. наук. Томск, 2019. 132 с.

*Дата поступления статьи: 27.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 10.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© С. Н. Данилова, С. Б. Ярусова, П. С. Гордиенко, А. А. Охлопкова, 2023

УДК 620.172

*Е. А. Домичек, В. К. Волкова, Е. А. Рогачев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИМ ИЛИ РУЧНЫМ СПОСОБОМ**

**Аннотация.** В работе изложены результаты исследования микрорельефа сварных швов изделий из сплава АМГ6. Методом электронной микроскопии установлено, что сварка приводит к значительному изменению структуры металла. Проанализированы дефекты и другие новообразования, возникающие в ходе принципиально разных видов сварки алюминия.

**Ключевые слова:** сварка, дефекты, алюминий, электронная микроскопия.

### **1. Введение**

В настоящее время существует большая потребность в контроле качества сварных швов алюминиевых изделий для расширения их эксплуатационных возможностей.

Благодаря своим уникальным химическим и физическим свойствам, к числу которых можно отнести высокую прочность, электропроводность и теплопроводность, пластичность, стойкость к взаимодействию с большим числом химических элементов, высокую коррозионную стойкость, легкий удельный вес, алюминиевые сплавы являются одними из самых популярных сплавов и находят своё применение во многих областях промышленности [1]. Качество сварного шва алюминиевого сплава оказывает важное влияние на прочность, усталостную долговечность и безопасность. При сварке алюминиевого сплава за счет эффекта термомеханической связи происходит сложное изменение микроструктуры шва, что приводит к существенным различиям в механических свойствах материалов зоны



сплавления (ЗС) и зоны термического влияния (ЗТВ) по сравнению с основным материалом. При сварке алюминия и алюминиевых сплавов важную роль играет взаимосвязь механических характеристик и микроструктурных свойств [2].

В работе приводятся результаты исследований по микрофотографиям поверхности алюминия в исходном состоянии и после сварки автоматическим и ручным способами.

## II. Постановка задачи

Цель исследования заключалась в определении особенностей изменения структуры микрорельефа сварных швов изделий из алюминия методом зондовой микроскопии.

## III. Методика эксперимента

Объектами исследования являлись образцы из сплава алюминия с магнием АМГ6 до и после сварки. Характеристики соответствуют ГОСТ 4784-2019.

Исследовались срезы сварных швов в месте внедрения детали в подложку.

Для проведения исследования образцы подготавливали в три этапа:

1. Первоначально проводилась механическая зачистка алмазным диском с целью удалить оксид алюминия  $Al_2O_3$  и убрать глубокие царапины.

2. Дальнейшая химическая обработка проводилась раствором Келлера.

3. С помощью фетра с пастой ГОИ доводили образцы до состояния «зеркала».

Исследование подготовленной поверхности проводилось методом зондовой микроскопии при помощи зондового датчика НН-С.

## IV. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены микрофотографии поверхности в исходном состоянии до сварки (1) и после сварки автоматическим (2) и ручным (3) способами.

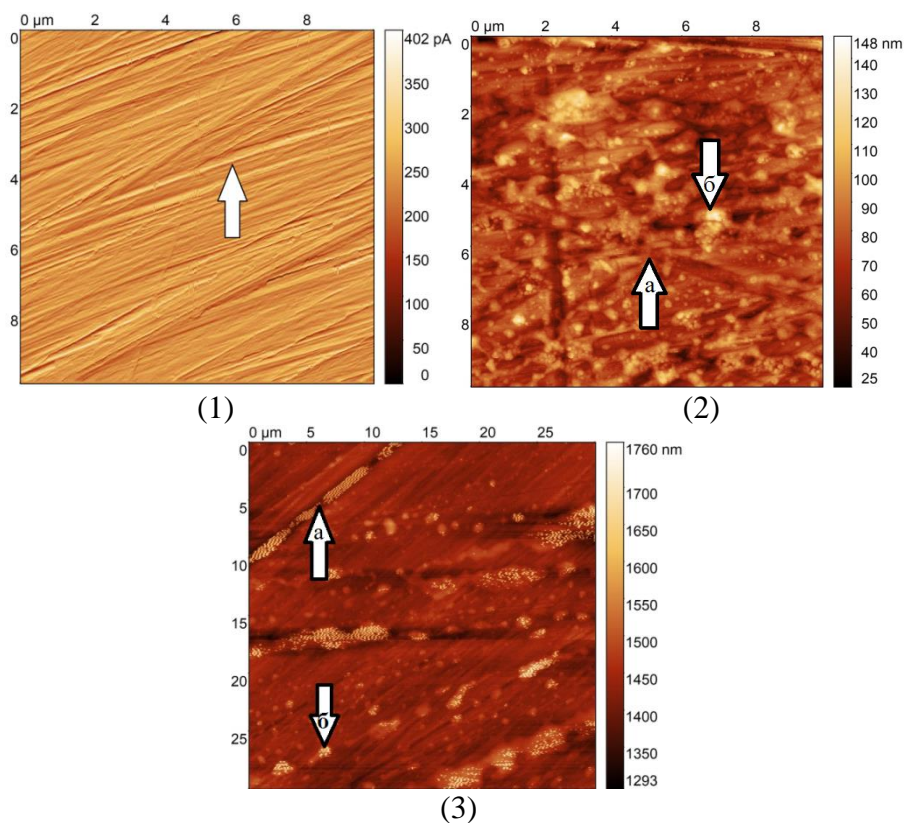


Рис. 1. Поверхность: (1) – в исходном состоянии, (2) – после автоматической сварки, (3) – после сварки ручным способом

На исходной поверхности видны сонаправленные риски, полученные вследствие предварительной подготовки образца. Воздействие сварки приводит к существенному изменению микрорельефа. Заметны образования «островкового» микрорельефа. На образце автоматического шва (2) помимо следов абразивной обработки (а) видны образования сферической формы (б). Обнаружено в среднем до 10 сферических кластеров диаметром 10–20 нм и высотой от 100 до 150 нм на 1 мкм<sup>2</sup>. Большая часть поверхности ручного шва (3) – это следы от абразивной обработки в виде продольных царапин (а). На поверхности также присутствуют сферические объекты (б), но в значительно меньшем количестве на единицу площади (от 3 до 5 на 1 мкм<sup>2</sup>). В дефектах зоны сплавления найдено большое количество усадочных пор со сферичностью менее 1,5–2 нм.

На рис. 2 представлена топография поверхности трёх исследуемых образцов. С использованием программного продукта Gwyddion-2.36 рассчитана шероховатость для образцов, полученных до и после сварки. Установлено, что в сварных швах шероховатость уменьшилась приблизительно в два раза с 0,22 мкм до 0,12 мкм у второго образца и до 0,105 мкм у третьего образца.

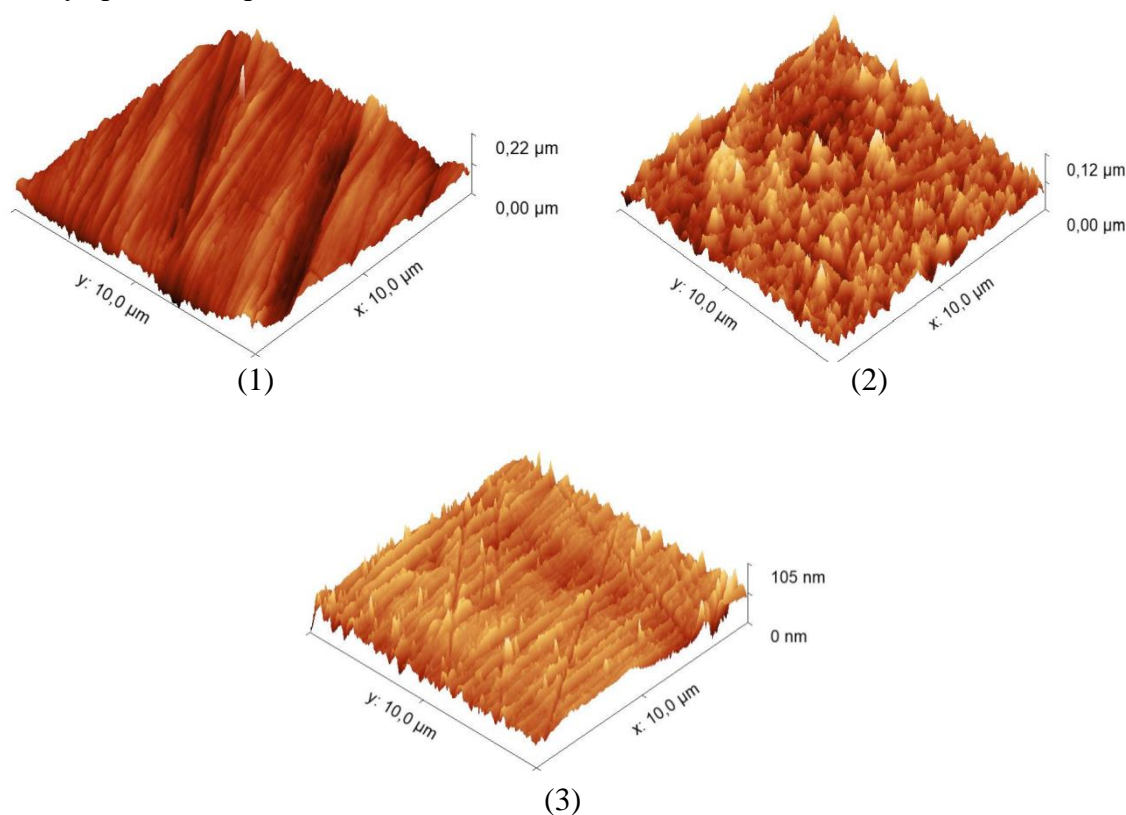


Рис. 2. Топография поверхности: (1) – в исходном состоянии, (2) – после автоматической сварки, (3) – после сварки ручным способом

## V. Заключение

В работе было проведено сравнительное исследование микрорельефа изделий из алюминия до и после сварки различными способами и получены результаты, демонстрирующие наличие появившихся в образцах новообразований, объяснение природы которых требует дальнейшего изучения.

В процессе автоматической сварки распределение присадочного материала происходило более равномерно за счет плавного поступательного движения сварочной головки и подачи сварочной проволоки в зоне сварки. Как следствие, в нашем исследовании не зафиксированы дефекты, связанные с появлением кристаллизационных трещин, хотя

обнаруженная шероховатость поверхности, судя по топографии, чуть выше, чем при ручном способе сварки.

Для выявления дефектов в изделиях и контроля качества при различных способах сварки необходимо проведение рентгеноструктурного анализа и ультразвуковых исследований.

#### **Библиографический список**

1. Sun W., Zhu Y., Marceau R. [et al.]. Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity // Science. 2019. Vol. 363. P. 972–975.

2. Rutherford B. A., Avery D. Z., Phillips B. J. [et al.]. Effect of Thermomechanical Processing on Fatigue Behavior in Solid-State Additive Manufacturing of Al-Mg-Si Alloy // Metals. 2020. Vol. 10. P. 947.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 24.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. А. Домичек, В. К. Волкова, Е. А. Рогачев, 2023

УДК 678.743.41

*Л. Ю. Дробот, Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова*

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАПОЛНЕННОГО КОКСОМ ВТОРИЧНОГО ФТОРОПЛАСТА-4 ПОСЛЕ ВЗРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ**

**Аннотация.** С целью разработки технологии переработки отходов фторопласта-4 и композитов на его основе взрывным прессованием (ВП) из отходов в виде стружки получен вторичный Ф4К20.

Изучено влияние давления ВП на плотность и кристаллическую структуру вторичного материала. Установлено, что повышение давления ВП снижает пористость вторичного Ф4К20, уменьшает степень кристалличности, увеличивает ширину его основного кристаллографического максимума за счет дробления кристаллитов и увеличения искажений кристаллической решетки полимера.

**Ключевые слова:** взрывное прессование, вторичный Ф4К20, кристаллическая структура, плотность.

#### **I. Введение**

Ф4К20 – полимерный композиционный материал на основе фторопласта-4 с содержанием 20% кокса. Изделия, изготовленные из Ф4К20, имеют широкий спектр применения как уплотнительные, электроизоляционные, антифрикционные и т.д., что способствует накоплению его отходов как в виде стружки при переработке в изделия, так и вышедших из строя деталей. Отсутствие эффективных способов вторичной переработки композитов на основе фторопласта-4 является большой экологической и экономической проблемой. Перспективно для переработки отходов фторопласта-4 и его композитов применение взрывного прессования (ВП), обеспечивающего модификацию структуры

трудноперерабатываемых термопластов и получение высоких эксплуатационных свойств изделий [1, 2].

Целью данного исследования является изучение влияния взрывного прессования на плотность полученных прессовок и кристаллическую структуру вторичного Ф4К20.

## II. Материалы и методы исследования

В работе исследовали прессовки, полученные взрывным прессованием в стальной цилиндрической ампуле стружки Ф4К20 после механической обработки промышленных заготовок. Нагружение осуществлялось кольцевым ударным фронтом. Давление прессования варьировалось от 0,2 до 0,8 ГПа, что достигалось изменением высоты и типа взрывчатого вещества. Спекание полученных заготовок проводили в замкнутом объеме (в обжатой стальной ампуле) при температуре 380 °С с выдержкой 10 мин на 1 мм толщины.

Структуру полученных материалов исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS GmbH, Germany) в излучении медного анода CuK $\alpha$ . Плотность прессовок определяли методом гидростатического взвешивания.

## III. Результаты исследований

В результате проведенных исследований взрывным прессованием с последующим спеканием получены монолитные прессовки вторичного Ф4К20, плотность которых увеличивается при повышении давления до 0,5–0,8 ГПа (таблица 1). За счет преобладающего механизма уплотнения при ВП монотонно снижается пористость вторичного материала с (П) 2,7% до 0,1 % с ростом давления ВП. Максимальная плотность 2,17 Мг/м<sup>3</sup>, соответствующая значениям монолитной прессовки первичного материала 2,15–2,17 Мг/м<sup>3</sup>, достигается при давлении ВП 0,5 ГПа. Увеличение давления до 0,8 ГПа приводит к снижению плотности, что, вероятно, связано с аморфизацией полимера по данным рентгеноструктурного анализа (таблица 2).

Необходимо отметить, что при ВП давлениями 0,5–0,8 ГПа достигнута высокая плотность вторичного материала без предварительного тонкодисперсного измельчения исходной стружки, что позволяет сократить технологический процесс ее переработки.

Таблица 1

**Зависимость плотности прессовок вторичного Ф4К20**

Давление ВП, ГПа	$\rho$ , Мг/м <sup>3</sup>	П, %
0,2	2,11	2,7
0,5	2,17	0,7
0,8	2,15	0,1

Методом РСА установлено, что независимо от давления ВП сохраняется аморфно-кристаллическая структура материала с высокой степенью кристалличности ( $\chi$ ) 56–67,4%. Наиболее интенсивный пик принадлежит фторопласту-4, который лежит, как и у исходного фторопласта-4, при  $2\theta = 18,0^\circ$ .

Увеличение интенсивности ударного воздействия до 0,8 ГПа оказывает влияние как на кристаллическую часть полимера, снижая  $\chi$  с 67,4 до 56,0 %, так и на аморфную, что вызвало уменьшение межслоевого расстояния, характерного для неупорядоченных областей полимера  $S_{ам}$ , с 5,71 нм до 5,18 нм.

Расчеты параметров кристаллической структуры фторопласта-4 во вторичном Ф4К20 показали (таблица 2), что с ростом давления ВП физическое уширение  $\beta$ , являющееся интегральной характеристикой структурных искажений кристаллической решетки полимера, увеличивается в 1,5 раза. Уширение кристаллического пика полимера обусловлено одновременно дроблением кристаллитов с 42,3 нм до 27,1 нм и увеличением относительной деформации кристаллической решетки с  $4,5 \cdot 10^{-3}$  до  $8,4 \cdot 10^{-3}$ . Такие изменения структуры связаны с интенсификацией воздействия сходящихся ударных волн с ростом давления ВП.

Таблица 2

**Параметры кристаллической структуры вторичного Ф4К20**

Давление ВП, ГПа	$\chi$ , %	$S_{ам}$ , нм	D, нм	$\beta, 10^{-3}$ , мрад	$\Delta d/d, 10^{-3}$
0,2	67,4	5,71	42,3	3,4	4,5
0,5	63,8	5,54	36,9	4,2	6,6
0,8	56,0	5,18	27,1	5,3	8,4

#### IV. Заключение

Проведённые исследования позволили оценить влияние давления ВП на формирование кристаллической структуры вторичного Ф4К20. Установлено, что рост давления ВП с 0,2 ГПа до 0,8 ГПа снижает в 1,2 раза степень кристалличности, уменьшает в 1,6 раз размер кристаллитов, увеличивает в 1,9 раз относительную деформацию кристаллической решетки.

Результаты проведённых исследований позволяют рекомендовать технологию взрывного прессования давлением 0,5–0,8 ГПа с последующем спеканием при 380 °С для переработки отходов Ф4К20 в цилиндрические прессы с плотностью 2,15–2,17 Мг/м<sup>3</sup>.

#### Библиографический список

1. Адаменко Н. А., Агафонова Г. В., Казуров А. В. Взрывная обработка термостойких полимеров: моногр. Волгоград: ВолгГТУ, 2020. 240 с.
2. Адаменко, Н. А., Агафонова Г. В., Седов Э. В.. Influence of explosive pressing on the formation of structure and properties of PTFE-based composites // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 11, part I. P. 276–280.
3. Адаменко Н. А., Агафонова Г. В., Богданов А. И. [и др.]. Влияние взрывного прессования на структуру вторичного фторопласта-4 // Известия ВолгГТУ: научный журнал. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2019. № 4 (227). С. 31–35.

*Дата поступления статьи: 23.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 31.03.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Л. Ю. Дробот, Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова, 2023

*А. А. Жуковская<sup>1</sup>, А. П. Солоненко<sup>1</sup>, А. Е. Шевченко<sup>1</sup>, П. А. Шабанова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА ЦИНКА В ГРАНУЛАХ ИЗ ВОЛЛАСТОНИТА НА ВЕЛИЧИНУ МИКРОТВЁРДОСТИ**

**Аннотация.** Выполнена оценка микротвёрдости синтетических органоминеральных сферических гранул из волластонита и желатина с варьируемым от 1,5 до 25 масс. % содержанием оксида цинка. Подобраны условия подготовки поверхности гранул для получения чётких отпечатков индентора. Установлено, что значения микротвёрдости лежат в пределах 22–37 МПа.

**Ключевые слова:** биоматериалы, гранулы, волластонит, оксид цинка, механические свойства, микротвёрдость.

### **I. Введение**

В последние десятилетия быстрыми темпами развивается область медицинской биотехнологии, нацеленной на повышение качества и продолжительности жизни. В частности, выполняется разработка биоматериалов (БМ) природного и синтетического происхождения, предназначенных для восстановления целостности и функций органов и тканей человека.

Для регенерации кожных покровов, мышечной ткани, кровеносных сосудов, костной ткани в настоящее время широко применяется ряд синтетических БМ, получаемых искусственным путём. При их создании в определённой степени ориентируются на состав и свойства живых тканей. Так, кость, как основу скелета, представляют три группы веществ: гидроксипатит (неорганический компонент, до 65 масс. %), коллаген (органическая составляющая, до 25 масс. %) и вода (до 10 масс. %). Кроме указанных веществ в костной ткани присутствуют в малых количествах другие органические соединения (отличные от коллагена белки, полисахариды, липиды) и минеральные компоненты. Интегральным показателем качества костной ткани является микротвёрдость (HV), которая зависит как от состояния неорганической составляющей, так и от качества межклеточного органического матрикса [1]. Особенностью кости человека является ухудшение механических свойств со временем. После 30 лет её объём постепенно уменьшается, возрастает пористость, костная ткань становится более хрупкой. Потенциальная травма кости приводит к снижению микротвёрдости как в зоне дефекта, так и на отдалённых участках органа.

Поскольку для замещения дефектов твердых тканей могут быть использованы БМ, представляется интересной оценка их микротвёрдости. В данной работе изучены синтетические гранулы на основе волластонита (ВТ,  $\beta$ -CaSiO<sub>3</sub>) и оксида цинка (ZnO), получаемые в научной лаборатории стоматологического факультета ОмГМУ.

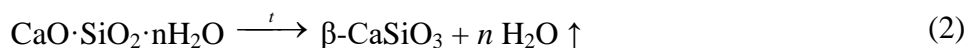
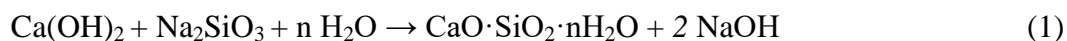
### **II. Постановка задачи**

Цель работы – оценить значения микротвёрдости гранул из волластонита в зависимости от содержания оксида цинка в них.

### **III. Теория**

Объект исследования – органоминеральные сферические гранулы на основе ВТ, оксида цинка (1,5, 2,5, 5, 10, 15, 20 и 25 масс. %) и желатина.

Для формирования гранул использованы синтетические порошки  $\beta$ -CaSiO<sub>3</sub> и ZnO, полученные по следующим реакциям:



Керамические порошки ВТ и ZnO смешивали друг с другом, затем с 15% водным раствором желатина, разогретым до 40 °С, в пропорции 1:(1–2) г/мл и перемешивали до получения однородной суспензии. Далее её добавляли по каплям в растительное масло, перемешиваемое со скоростью 1000 об/мин при помощи магнитной мешалки. Образовавшиеся под действием центробежной силы сферические полидисперсные гранулы охлаждали, отмывали от масла изопропиловым спиртом и высушивали при комнатной температуре в течение 24 часов.

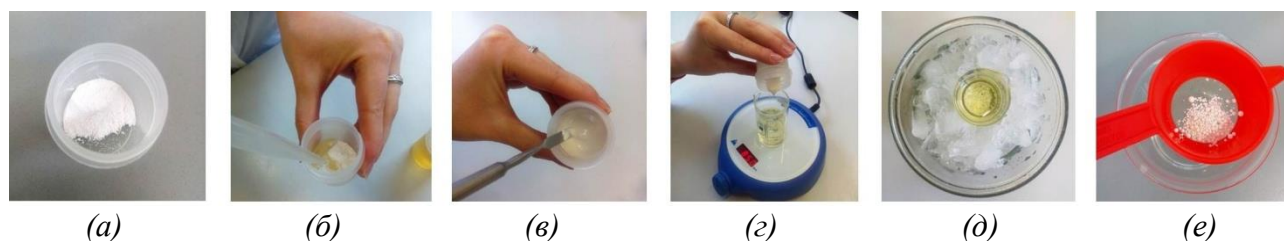


Рис. 1. Схема получения гранул:

*a* – подготовка порошка, *б* – прибавление желатина, *в* – смешение порошка и желатина, *г* – прикапывание суспензии к маслу при перемешивании, *д* – выдерживание гранул на холоде, *е* – отмывка гранул от масла и высушивание на воздухе

Изучение микротвёрдости по методу Виккерса проводили на приборе «ПМТ-3», согласно ГОСТ 2999-75 [2]. Для исследования отбирали не менее 7 крупных гранул каждого образца ВТ с различным содержанием ZnO (1,5–25 масс. %). При помощи металлических кусочек гранулы раскалывали на 2 части, одну из частей отбрасывали, вторую полировали наждачной бумагой. Полученную поверхность закрашивали чёрным спиртовым маркером. Для выполнения измерений образец фиксировали на металлическом столике, в него под действием нагрузки  $P$  вдавливали алмазный наконечник в форме правильной четырёхгранной пирамиды с углом при вершине 136°. Величина нагрузки составляла 10 г, время выдержки – 10–15 с. На каждую гранулу наносили по 3 отпечатка, для которых после снятия нагрузки измеряли диагональ ( $d$ ). Величину микротвёрдости вычисляли по формуле:

$$HV = k \cdot \frac{P}{d^2} \cdot 10^6 \quad (5)$$

где  $k = 0,189$  – постоянная.

Полученные значения HV проверяли на наличие грубых промахов. По выборке рассчитывали стандартное отклонение и доверительный интервал из предположения о нормальном распределении экспериментальных данных и с использованием критерия Стьюдента.

#### IV. Результаты экспериментов

В ходе измерений получена серия значений микротвёрдости для гранул из ВТ и желатина с варьирваемым содержанием ZnO. Экспериментальные данные представлены на



рис. 1. Видно, что гранулы, содержащие 1,5 и 2,5 масс. % ZnO, имеют наибольшую HV (35,8 и 37,3 МПа, соответственно). Образцы, в состав которых входит 5–25 масс. % ZnO, характеризуются близкими значениями микротвёрдости (в пределах 22–25 МПа).

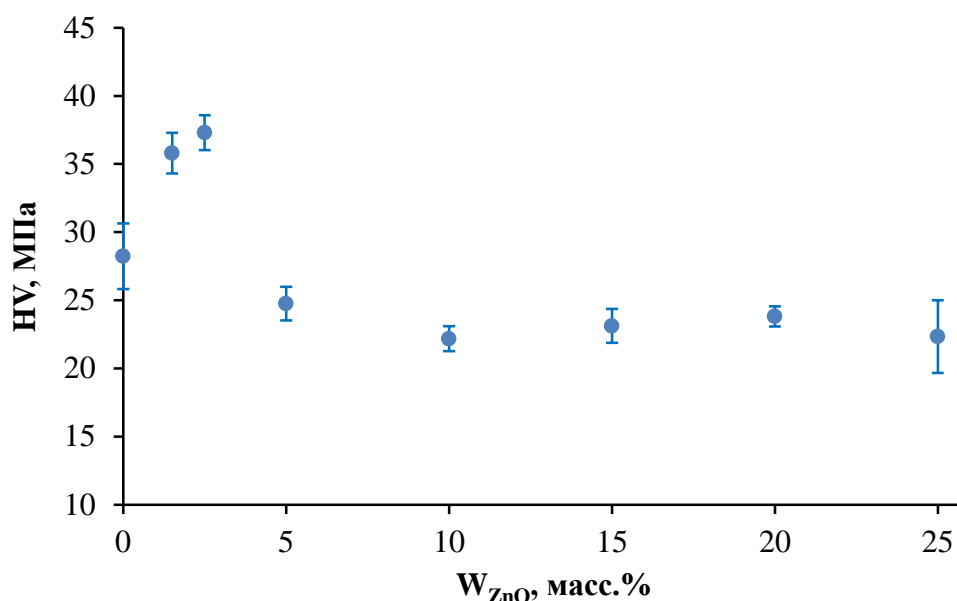


Рис. 1. Зависимость микротвёрдости от содержания ZnO в гранулах из ВТ и желатина

#### V. Обсуждение результатов

БМ различного состава для костной пластики часто тестируют для оценки их механических свойств, в частности микротвёрдости. Так, установлено, что минерал триоксид агрегат (МТА) имеет микротвёрдость 33,28 кгс/мм<sup>2</sup> [3], плотная керамика из гидроксиапатита – 4,9 ГПа [4], нити из полимолочной кислоты и гидроксиапатита – 17,5 МПа [5].

Также имеются данные о микротвёрдости костной ткани. В статье [6] исследованы образцы кортикальной кости человека различной локализации, для них получены значения HV в пределах от 20 до 60 МПа.

Полученные результаты измерений микротвердости гранул из ВТ, ZnO и желатина согласуются с литературными данными о механических свойствах схожих по составу композитов и близки к значениям HV костной ткани человека.

#### VI. Выводы и заключение

Определена микротвёрдость синтетических гранул из ВТ и желатина с варьируемым содержанием ZnO. Установлено, что значения HV лежат в пределах 22–37 МПа и с ростом доли оксида цинка меняются немонотонно.

#### Благодарности

Авторы благодарят к.п.н., доцента кафедры «Физика» ОмГТУ Д. А. Полонянкина, к.т.н., доцента, директора Научно-образовательного ресурсного центра «Нанотехнологии» ОмГТУ Е. А. Рогачёва за содействие в выполнении измерений на приборе «ПМТ-3М».

#### Библиографический список

1. Zaitseva N. V. Microhardness of Bone Tissue After Different Alloy Implantation // European Journal of Medicine. Series B. 2015. Vol. 4, no. 3. P. 148–154.



2. Бикбаева З. Г., Полисадова В. В., Панина А. А. Микротвёрдость керамических материалов // Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. 23 с.

3. Shahi S., Rahimi S., Yavari H. R. [et al.]. Effect of the Bone Graft on the Surface Microhardness of Endodontic Biomaterials // Iranian Endodontic Journal. 2018. Vol. 13, no. 2. P. 200–203. Doi:10.22037/iej.v13i2.1468.

4. Cox F. P., Pomeroy M. J. and Murphy M. E. Effect of Temperature and Time on the Sintering, Phase Stability, Microstructure and Microhardness of Commercially Available Hydroxyapatite // Key Engineering Materials. 2005. Vols. 284–286. P. 345–348. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.284-286.345.

5. Kaya İ., Şahin M. C., Cingöz İ. D. [et al.]. Three Dimensional Printing and Biomaterials in the Repairment of Bone Defects; Hydroxyapatite PLA Filaments // Turkish Journal of Medical Sciences. 2019. Vol. 49, no. 3. P. 922–927. Doi:10.3906/sag-1901-184.

6. Ramrakhiani M., Deepti P., Murty T.S. Micro-indentation hardness studies of human bodies // Acta Anatomica. 1997. Vol. 103, no. 3. P. 358–362. Doi:10.1159/000145035.

*Дата поступления статьи: 28.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 07.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Жуковская, А. П. Солоненко, А. Е. Шевченко, П. А. Шабанова, 2023

УДК 678.5

*Ю. В. Капитонова, А. А. Охлопкова*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И СЛОИСТЫХ СИЛИКАТОВ**

**Аннотация.** В работе приведены данные по исследованию структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), содержащих серпентин, флогопит, а также шпинель магния. Исследованы триботехнические характеристики полимерных композитов. Показано, что добавление серпентина и шпинели магния повышает износостойкость композита до 1100 раз по сравнению с исходным ПТФЭ. Установлено, что частицы наполнителей и ПТФЭ способствуют образованию вторичной структуры на поверхности трения, что способствует снижению процесса изнашивания материала. Методами инфракрасной и энергодисперсионной спектроскопии показано, что на поверхности трения композитов протекают трибохимические реакции, приводящие к формированию сшитой и износостойкой структуры.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, политетрафторэтилен, износостойкие композиты, слоистые силикаты.

### **I. Введение**

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) – полимер, который часто используется при создании антифрикционных композиционных материалов благодаря своим уникальным свойствам, таким как механические и фрикционные свойства, высокая химическая стойкость, низкий коэффициент трения и высокая термическая стабильность [1, 2]. Существенный недостаток

ПТФЭ заключается в очень низкой износостойкости, поэтому часто в ПТФЭ добавляют различные армирующие элементы [3–5]. В качестве армирующих добавок, улучшающих триботехнические характеристики при сохранении деформационно-прочностных параметров на уровне исходного ПТФЭ, используются наполнители различной химической природы, частицы которых имеют разнообразные геометрические формы и размеры.

При создании полимерных композиционных материалов (ПКМ) триботехнического назначения большое внимание уделяется процессам, протекающим в зоне фрикционного контакта. Изучению механизмов изнашивания ПКМ на основе ПТФЭ уделяется пристальное внимание в последние десятилетия. Были установлены механизмы снижения износа композитов ПТФЭ/оксид алюминия в работе Burtis и др., где показано, что основным фактором являются формирование пленки переноса из материала композита и частиц износа на контртеле и протекание трибохимических реакций на поверхности трения [6]. В работе Harris и др. показано, что существенную роль при формировании прочной пленки переноса играют такие процессы, как химическое взаимодействие между полимерным композитом, наполнителями, окружающей средой и металлическим контртелом [7]. Анализ результатов исследований, проведенных в области разработки ПКМ на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), свидетельствует о малой изученности закономерностей изнашивания ПКМ, содержащих слоистые силикаты [4, 5, 8–10].

В данной статье основной целью работы являлось исследование влияния слоистых силикатов и шпинели магния на структуру и триботехнические свойства ПТФЭ, а также установление факторов, влияющих на механизм изнашивания.

## II. Материалы и методы исследований

В качестве полимерной матрицы выбран ПТФЭ марки ПН-90 (ГОСТ 10007-80). В качестве наполнителей выбраны природные слоистые силикаты – серпентин (СП) и флогопит (ФЛ), а также синтетическая шпинель магния (ШМ). Серпентин и флогопит – минералы, представляющие собой слоистые силикаты с общей химической формулой  $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$  и  $KMg_3[AlSi_3O_{10}](F,OH)_2$ , соответственно. Слоистые силикаты предварительно были подвергнуты механической активации в планетарной мельнице «Активатор 2S» (г. Новосибирск). Синтетическая шпинель магния представляет собой двойной оксид с формулой  $MgAl_2O_4$ , полученный механохимическим методом в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН (г. Новосибирск).

В работе приведены результаты триботехнических исследований (погрешность составляет 3%) композитов, содержащих 0,5–5 мас.% слоистых силикатов и 0,1–1 мас.% шпинели магния. Схема триботехнических испытаний «палец-диск». Для испытаний использовали цилиндрические образцы (диаметром 10 мм и высотой 20 мм), контртело – стальной диск (марка 45, твердость 45–50 HRC, шероховатость  $Ra = 0,06–0,08$  мкм). Испытания проводились для пары трения полимерный композит-сталь с использованием универсального трибометра UMT-3 (CETR). Для всех образцов значения параметров испытаний следующие: скорость скольжения – 0,2 м/с, нагрузка – 2 МПа. Время испытаний – 3 ч. Коэффициент трения рассчитывали согласно ASTM D 1894-08. Структурные исследования ПКМ проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДС), инфракрасной (ИК) спектроскопии.

## III. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены результаты исследования триботехнических свойств композитов в зависимости от содержания наполнителей.

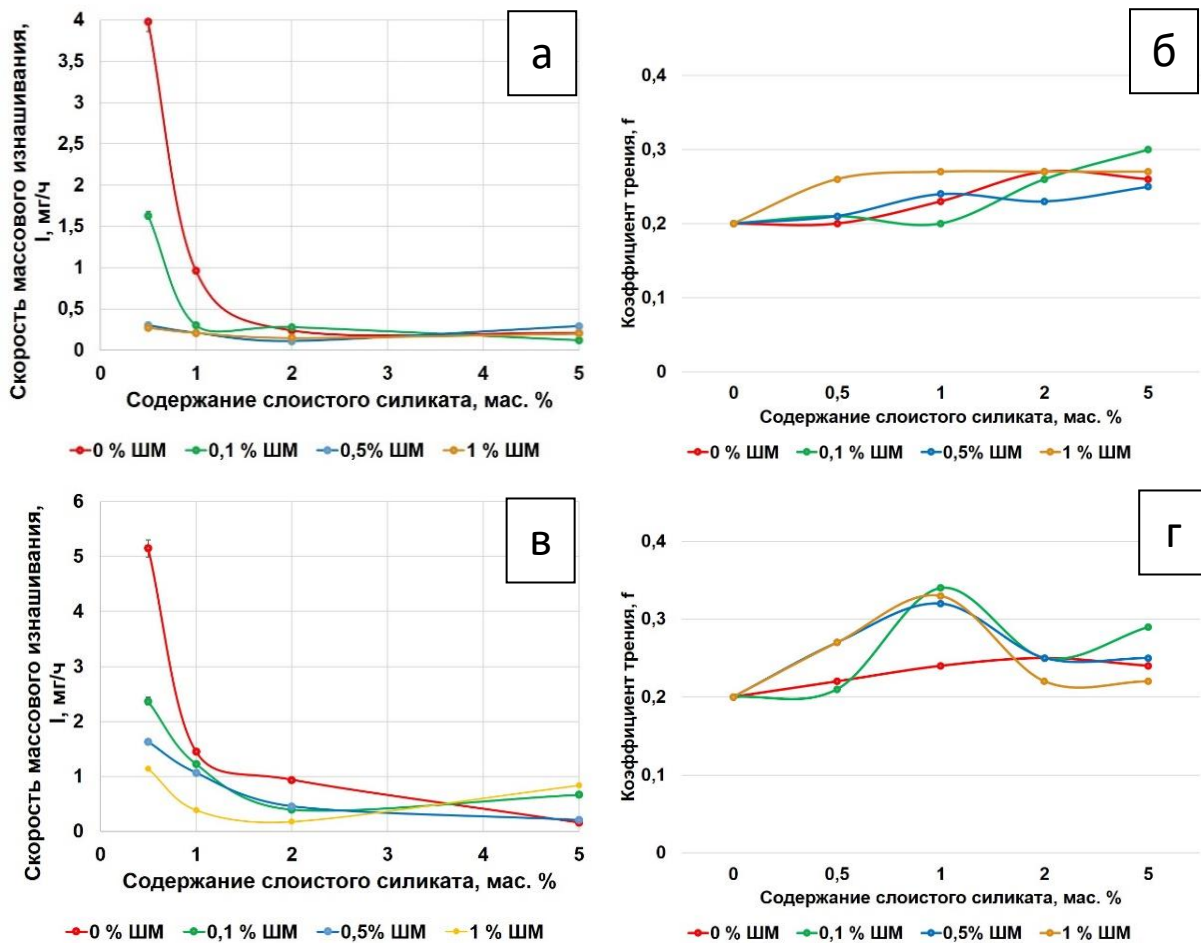


Рис. 1. Зависимость скорости массового изнашивания и коэффициента трения композитов от содержания серпентина (а,б), флогопита (в,г)

Из результатов триботехнических испытаний для композитов (рис. 1) можно отметить постепенное снижение показателя скорости массового изнашивания при увеличении содержания наполнителей. Скорость массового изнашивания композитов, содержащих серпентин и ШМ, снижается до 1130 раз относительно исходного ПТФЭ, значения коэффициента трения составляют 0,24–0,35. Скорость массового изнашивания композитов, содержащих флогопит, до 800 раз ниже, чем у исходного ПТФЭ, коэффициент трения составляет 0,21–0,33. В целом, скорость массового изнашивания композитов, содержащих ШМ, характеризуется более высокой износостойкостью, чем композитов без ШМ, что объясняется более активным участием ШМ в процессах трения.

Изменения в триботехнических характеристиках ПКМ, содержащих слоистые силикаты, вероятнее всего связаны с процессом образования вторичной структуры, предохраняющей материал от повышенного износа. Для изучения данного предположения были проведены структурные исследования поверхности трения и образцов композитов методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. На рис. 2 показаны микрофотографии поперечного скола поверхности трения композита, содержащего 2 мас. % серпентина. Сформированный слой отличается по своей структуре от объема самого материала. Исходя из микрофотографий, можно сделать предположение о формировании слоя вторичной структуры с толщиной приблизительно 4 мкм, состоящего из частиц наполнителей и частиц износа композиционного материала. На рисунке четко видны ровные края и границы между защитным слоем и объемом композиционного материала. Такой слой может выполнять роль твердой смазки, предотвращающей износ материала в

процессе трения. У композитов, содержащих флогопит, формирование такого слоя не наблюдается, что объясняется низкой адгезией частиц флогопита и полимера, а также большим размером частиц, получаемых после механоактивации слоистого силиката.

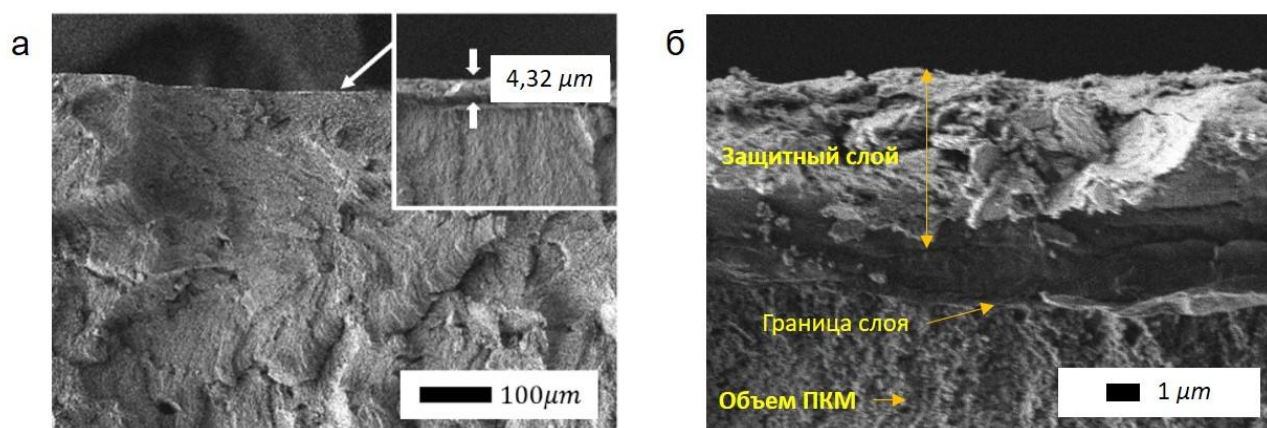


Рис. 2. Микрофотографии: а) поперечного скола поверхности трения ПКМ, содержащего 2 мас. % серпентина; б) то же при большем увеличении

Повышение износостойкости материала связано не только с формированием защитного слоя, но также протеканием на поверхности трения трибохимических процессов. Для подтверждения предположения о влиянии трибоокислительных процессов на структуру поверхности трения композитов проведены исследования методом ИК и ЭДС. Методом ЭДС показано, что в образцах после трения появляются новые пики, относящиеся к элементам Fe и Cr. Появление данных пиков свидетельствует об участии металла контртела в химическом взаимодействии с полимером в процессе трения. Данные, полученные с помощью ИК-спектроскопии, также подтверждают протекание трибоокислительных процессов в зоне фрикционного контакта ПКМ-контртела. Исследовали ИК-спектры композитов до и после трения.

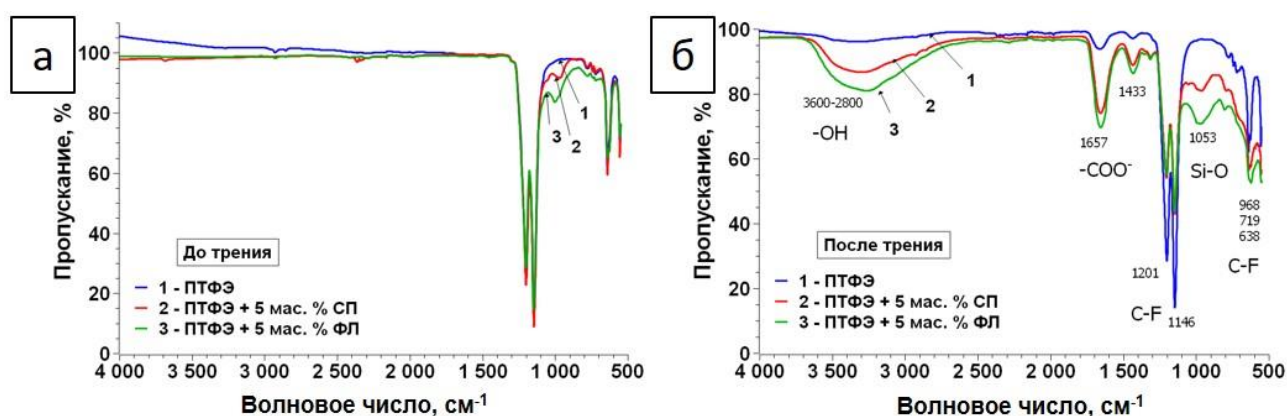


Рис. 3. ИК-спектры композитов, содержащих слоистые силикаты (5 мас.%) до (а) и после (б) трения: 1 – ПТФЭ, 2 – ПТФЭ+5 мас.% СП, 3 – ПТФЭ+5 мас.% ФЛ

На рис. 3 представлены ИК-спектры композиционных материалов до и после трения в зависимости от содержания наполнителей. Можно наблюдать существенное повышение интенсивности пиков в спектрах образцов после трения. Во всех ИК-спектрах представлены интенсивные полосы поглощения, характерные для ПТФЭ: валентные ( $1200$  и  $1147$   $\text{см}^{-1}$ ), веерные ( $640$   $\text{см}^{-1}$ ) и деформационные ( $552$   $\text{см}^{-1}$ ) колебания  $\text{CF}_2$ -групп. Также во всех спектрах присутствуют полосы ( $800$   $\text{см}^{-1}$ ), относящиеся к колебаниям макромолекул ПТФЭ в

аморфной фазе [11]. В процессе трения под воздействием влаги и кислорода воздуха происходит образование поверхностных пленок определенного состава и структуры, влияющих на дальнейший процесс изнашивания. Так, в спектрах образцов после трения появляются новые пики, характерные для продуктов трибоокисления: широкие полосы поглощения валентных колебаний ОН-связей в области 3600–2500 см<sup>-1</sup>, симметричные и антисимметричные колебания карбоксилат-анионов (1665, 1440, 1310 см<sup>-1</sup>) [12]. Образующаяся в результате система способна во много раз сократить износ полимерного материала после начального периода приработки. Авторы Hattis и Khare при изучении ПКМ на основе ПТФЭ и оксида алюминия утверждают, что снижение износа связано именно с трибохимическими реакциями на границе поверхности трения, в результате которых образуются концевые группы карбоновой кислоты на молекулах ПТФЭ, которые хелатируются с противоионами и частицами оксида алюминия [7, 13]. При этом образуется пленка переноса на контртеле и формируется армированная структура на поверхности композита.

## VI. Заключение

В условиях фрикционного действия в ПКМ на основе ПТФЭ протекают физико-химические процессы деструкции и окисления, вызывающие изменения химического и фазового состава, а также параметров надмолекулярной структуры поверхностного слоя, которые приводят к изменению триботехнических свойств материала. Введение серпентина и шпинели магния способствовало улучшению износостойкости до 1130 раз по сравнению с исходным ПТФЭ, а флогопита до 800 раз. Методом СЭМ установлено, что основным фактором повышения износостойкости композитов, содержащих слоистые силикаты, является формирование на границе трения защитного слоя вторичной структуры, снижающего износ материала. Структура данного слоя отличается от структуры в объеме самого композита. Методом СЭМ показано, что защитный слой состоит из частиц износа, образующихся при трении, и частиц наполнителей. Исследования методами ИК- и ЭД спектроскопии подтверждают протекание трибоокислительных процессов, протекающих в зоне трения ПКМ-контртела. Таким образом, формирование вторичного защитного слоя представляет собой сложный процесс, который включает в себя химическое взаимодействие полимерного композита с частицами наполнителей, окружающей средой и поверхностью металла контртела.

Работа выполнена при финансовой поддержке – Госзадание Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности №FSRG-2021-0016.

## Библиографический список

1. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review // *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2018. Vol.1. P. 247–268. Doi:10.1007/s42114-018-0023-8.
2. Renfrew M. M., Lewis E. E. Polytetrafluoroethylene – Heat Resistant, Chemically Inert Plastic // *Industrial and Engineering Chemistry.* 1946. Vol. 38. P. 870–877. Doi: 10.1021/ie50441a009.
3. Gong D. L., Xue Q. J., Wang H. L. Study of the Wear of Filled Polytetrafluoroethylene // *Wear.* 1989. Vol.134. P. 283–295. Doi: 10.1016/0043-1648(89)90131-2.
4. Tanaka K., Kawakami S. Effect of Various Fillers on the Friction and Wear of Polytetrafluoroethylene-Based Composites // *Wear.* 1982. Vol. 79. P. 221–234. Doi: 10.1016/0043-1648(82)90170-3.
5. Bahadur S., Tabor D. The Wear of Filled Polytetrafluoroethylene // *Wear.* 1984. Vol. 98. P. 1–13. Doi: 10.1016/0043-1648(84)90213-8.

6. Burris D. L., Sawyer W. G. Improved wear resistance in alumina-PTFE nanocomposites with irregular shaped nanoparticles // *Wear*. 2006. Vol. 260. P. 915–918. Doi:10.1016/j.wear.2005.06.009.
7. Harris K. L., Pitenis A. A., Sawyer W. G. [et al.] PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films // *Macromolecules*. 2015. Vol. 48. P. 3739–3745. Doi: 10.1021/acs.macromol.5b00452.
8. Sawyer W. G., Freudenberg K. D., Bhimaraj P. [et al.]. A Study on the Friction and Wear Behavior of PTFE Filled with Alumina Nanoparticles // *Wear*. 2015. Vol. 254. P. 573–580. Doi: 10.1016/S0043-1648(03)00252-7.
9. Li F., Hu K. A., Li J. L. [et al.]. The Friction and Wear Characteristics of Nanometer ZnO Filled Polytetrafluoroethylene // *Wear*. 2001. Vol. 249. P. 877–882. Doi:10.1016/S0043-1648(01)00816-X.
10. Burris D. L., Santos K., Lewis S. L. [et al.]. Polytetrafluoroethylene matrix nanocomposites for tribological applications. Oxford: Elsevier, 2008. P. 403–438.
11. Bely V. A., Sviridenok A. I., Petrokovets M. I. Friction and wear in polymer-based materials. Oxford: Pergamon Press, 1982. 426 p.
12. Ye J., Burris D. L., Xie T. A review of transfer films and their role in ultra-low-wear sliding of polymers // *Lubricants*. 2016. Vol. 4. P.4. Doi:10.3390/lubricants4010004.
13. Khare H. S., Moore A. C., Haidar D. R. [et al.]. Interrelated effects of temperature and environment on wear and tribochemistry of an ultralow wear PTFE composite // *J. Phys. Chem. C*. 2015. Vol. 119. P. 16518–16527. DOI:10.1021/acs.jpcc.5b00947.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Ю. В. Капитонова, А. А. Охлопкова, 2023

УДК 53.082.18

*Я. А. Ковалёва, А. С. Брундуков*

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОМПРЕССОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

**Аннотация.** Предложен оригинальный метод определения износа полимерных композиционных материалов для машин трения, работающих по схеме «палец-диск». В методе предложены принципиально новые геометрические параметры образцов для испытаний на машине трения.

**Ключевые слова:** метод, износ, интенсивность изнашивания.

### **I. Введение**

В настоящее время полимерные материалы находят применение практически во всех сферах деятельности человека. Используются как для создания простейших изделий, так и очень ответственных, например, в космической отрасли. Во всех случаях неизменным

является контроль качества, т.к. для потребителей главным показателем всегда является то, сколько сможет прослужить то или иное изделие до поломки или определенной степени износа.

Ввиду большого объема выпуска различных полимерных композиционных материалов (ПКМ) производительность процессов контроля имеет большую важность. Она зависит от того, как быстро происходят испытание образцов и анализ полученных результатов [1]. Современное оборудование для испытаний на износ, как правило, является весьма сложным и дорогостоящим, и требует условий для корректной работы (обучение персонала, создание отдельных помещений с высокими требованиями).

По результатам экспериментов проводится анализ данных при помощи микроскопа и программного обеспечения (ПО) и рассчитывается износ каждого образца.

В основе предлагаемой методики заложен принцип «палец-диск», который в настоящее время широко применим [2, 3]. Ввиду наличия у современных ПКМ высоких показателей износостойкости вопрос об оптимальном подборе граничных условий (геометрия образцов, режимы нагружения, скоростные режимы и т.д.) исследований остается всегда актуальным.

## **II. Материалы и методы**

Исследования проводились с помощью программно-аппаратного комплекса для экспресс-испытаний триботехнических материалов на износ по схеме «палец-диск» (см. рис. 1а). Определение геометрических параметров образцов и пятен износа проводилось при помощи микрометра [3] и микроскопа БИМ-1Ц.

## **III. Результаты и их обсуждение**

Испытания проходят одновременно на трех образцах с геометрией рабочей поверхности в виде усеченного конуса (см. рис. 1б) по плоской поверхности диска (контртела), выполненного из стали с шероховатостью Ra 0,1...0,3 мкм. Изменение геометрических параметров образцов (угол и высота усеченного конуса) позволяет применять метод для ПКМ с разной степенью износостойкости, что делает его универсальным, в частности, относительно композитов, применяемых в компрессорном оборудовании.

Если материалы обладают относительно низкой износостойкостью, то следы износа не подлежат регистрации, но это не говорит о том, что сам материал не пригоден для применения в конкретных узлах трения. Для реализации стандартных методов изменение геометрии образцов является затруднительным, т.к. сферическая часть формируется специальным инструментом (фасонный резец), и для корреляции значений износа низко- и высокоизносостойких материалов по этим методам необходимо наличие целого набора специализированного инструмента, в отличие от предлагаемого метода.

Перед испытанием рабочие поверхности образцов и контртела протираются безворсовой тканью, смоченной в этиловом спирте по ГОСТ 5962-2013 [4] и сушатся в течение двух мин при комнатной температуре. Параметры проведения экспериментов индивидуальны для каждого ПКМ и зависят от его износостойкости. При испытании образцы приводятся в соприкосновение с контртелом, затем нагружаются. Нормальная нагрузка на три образца в зависимости от материала отличается. Линейная скорость скольжения 1,0...1,3 м/с, температура поверхности контртела должна быть ниже 50 °С. Путь трения зависит от материала образцов и находится в диапазоне от 100 м до  $15 \cdot 10^3$  м. Приработка и испытание проводятся по одной дорожке трения, которая убирается при каждом новом испытании.

После приработки рабочая плоскость усеченного конуса приобретает геометрию эллипса из-за неравномерного радиуса трения и, следовательно, линейной скорости



скольжения по контртелу, поэтому регистрация пятна износа проводится в 4 направлениях под 45° (см. рис. 1в).

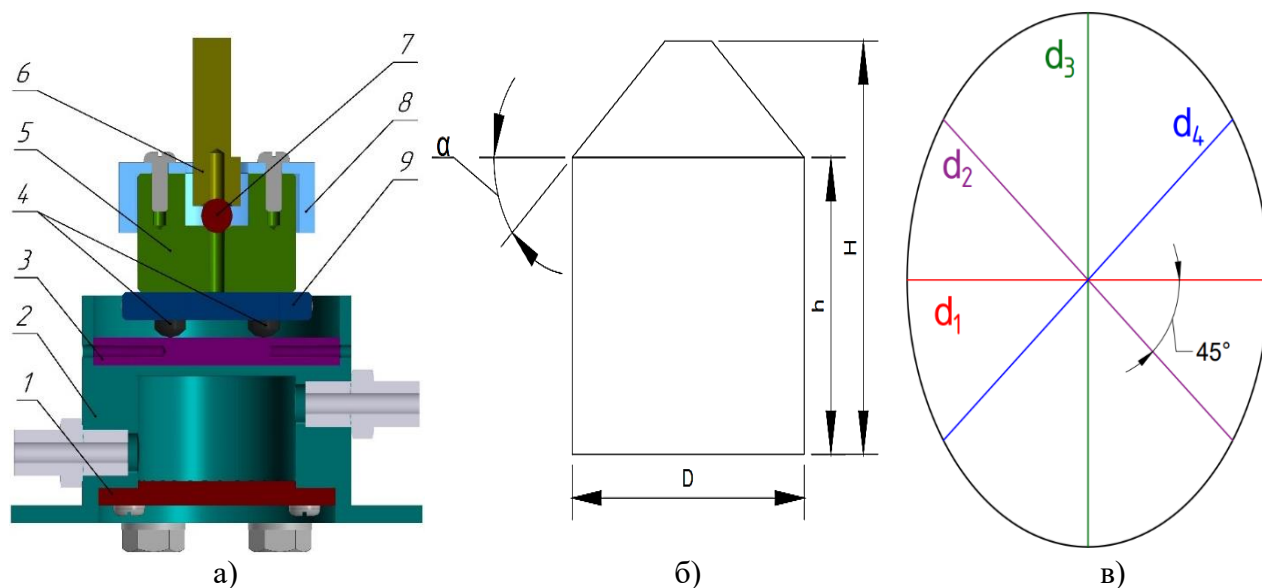


Рис. 1. Схема трения:

- а) узел трения: 1 – крышка основания, 2 – основание, 3 – контртело, 4 – образец, 5 – переходник, 6 – вращатель, 7 – шарик, 8 – крышка вращателя, 9 – держатель образцов;  
 б) образец с усеченным конусом на конце:  $\alpha$  – угол у основания конуса,  $h$  – высота цилиндра,  $H$  – высота образца,  $D$  – диаметр образца; в) схема определения диагоналей пятна износа

Изменение угла конуса не изменяет площади контакта образцов с поверхностью контртела и не усложняет расчётную часть предлагаемого метода.

Время испытания в минутах вычисляют по формуле:

$$\tau = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R_{TP} \cdot n}, \quad (1)$$

где  $S$  – путь трения, м;  $R_{TP}$  – радиус трения, м;  $n$  – частота вращения, об/мин.

Число оборотов в минуту вычисляют по формуле:

$$n = \frac{V \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_{TP}}, \quad (2)$$

где  $V$  – линейная скорость скольжения, м/с;  $R_{TP}$  – радиус трения, м.

До испытания, после приработки и после основного пути измеряются диаметры усеченного конуса (пятна износа) каждого образца в четырех направлениях под углом 45° друг к другу и рассчитывается средний диаметр приработанного следа износа каждого  $i$ -того образца по формуле (3). Погрешность определения диаметров соответствует погрешности оборудования, котором проводится их регистрация.

$$d_i^k = \frac{\sum_{j=1}^4 d_{ij}}{4}, \quad (3)$$

где  $d_{ij}$  – диаметр следа износа  $j$ -того направления измерения  $i$ -того образца;  $j$  – номер направления измерения  $i$ -того образца;  $i$  – номер образца;  $k$  – номер измерения (до испытания – 1, после приработки – 2, после основного пути – 3).



Объем износа усеченного конуса каждого образца в мм<sup>3</sup> вычисляют по формуле:

$$V_i = \frac{1}{24} \pi \cdot tga \cdot ((d_i^k)^3 - (d_i^{k-1})^3), \quad (4)$$

где  $tga$  – тангенс угла наклона образующей конуса;  $d_i^k$  – средний диаметр следа износа  $i$ -того образца, мм.

Износ (мм<sup>3</sup>/(Н·м)) рассчитывают по формуле:

$$J = \frac{\sum_{i=1}^3 (V_{i2} - V_{i1})}{N_3 \cdot S}, \quad (5)$$

где  $N_3$  – нормальная нагрузка на три образца, Н;  $S$  – путь трения, м.

Безразмерную интенсивность изнашивания  $I_i$ , представляющую собой отношение толщины износившегося слоя к пути трения для каждого пальца, определяют по формуле:

$$I_i = \frac{h_i}{S}, \quad (6)$$

где  $S$  – путь трения, км;  $h_i$  – толщина износившегося слоя.

Толщина износившегося слоя вычисляется по формуле:

$$h_i = \frac{1}{2} (d_i^k - d_i^{k-1}) tga. \quad (7)$$

Окончательное значение интенсивности изнашивания  $I$  получается усреднением трех полученных значений  $I_i$  по формуле:

$$I = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_i. \quad (8)$$

## VI. Заключение

Новый метод учитывает возможность задания геометрии рабочей части образцов (угол усеченного конуса), которая в сочетании с широким диапазоном режимов проведения испытаний делает ее универсальной и адаптированной под материалы с разной устойчивостью к истиранию без увеличения продолжительности времени проведения экспериментов. Сохранение принципа экспресс-испытаний является актуальным для исследований любых полимерных и композиционных материалов.

Научный руководитель: кандидат технических наук Гракович Петр Николаевич, ведущий научный сотрудник, Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси».

### Библиографический список

1. Григорьев А. Я., Гуцев Д. М., Зозуля А. П. [и др.]. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 // Трение и износ. 2014. Т. 35, № 6. С. 664–669.
2. Воропаев В. В. Структурно-морфологические закономерности получения высокопрочных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // Механика композиционных материалов и конструкций: докл. IV Всерос. симпозиума, 4–6 декабря 2012 г. Москва, 2012. С.25.
3. ТУ РБ 03535279.071–99. Заготовки из фторопластовой композиции ФЛУВИС. Введ. 20.12.99. Минск: Госстандарт, 1999. 13 с.
4. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия. Введ. 1991–01–01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1991. 12 с.

5. ГОСТ 5962-2013. Спирт этиловый ректификованный технический. Технические условия. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 4 с.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 15.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Я. А. Ковалёва, А. С. Брундуков, 2023

УДК 678.073

*Е. С. Колесова, О. В. Гоголева*

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНОГО НАНОАЛМАЗА НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

**Аннотация.** В работе исследовано влияние природного нанодиаза на физико-механические и триботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Установлено, что введение наночастиц алмаза приводит к повышению прочностных показателей и к значительному снижению скорости массового изнашивания. Показано, что существенное улучшение исследованных показателей достигается при модифицировании от 0,05 до 0,5 мас.%. Разработаны полимерные композиционные материалы на основе СВМПЭ с улучшенным комплексом эксплуатационных показателей.

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, природный нанодиаз, прочность, износостойкость.

### **I. Введение**

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) считается относительно новым материалом, перспективным для применения в различных областях ввиду наличия целого комплекса ценных свойств. Изделия, полученные из СВМПЭ, характеризуются низкими коэффициентом трения и ползучестью, а также высокой износостойкостью. Кроме того, они обладают практически нулевым водопоглощением, высокой стойкостью к растрескиванию и к действию агрессивных сред, повышенной морозостойкостью, прочностью и ударопрочностью [1–5]. Композиты на основе СВМПЭ применяются как износостойкие материалы технического и медицинского назначения, материалы для защиты от радиационного и сверхвысококачественного излучения, а также в качестве футеровки емкостей, транспортного и технологического оборудования.

Анализ научно-технической информации показывает возможность применения для создания новых композитов на основе СВМПЭ подходов с применением механической активации, совместной активации, ультразвукового, радиационного воздействия, облучения ионами и т.д. [6–8]. Несмотря на это, перспективным, распространенным и доступным способом повышения эксплуатационных свойств композиционных материалов на основе СВМПЭ является и остается модифицирование нанодисперсными наполнителями различной природы с подобранным для каждого конкретного случая гранулометрическим составом и объемным соотношением фракций. В работе [9] показано, что композиты, содержащие наносеребро в количестве 0,2 и 0,4 мас. %, имеют лучшие трибологические показатели по

сравнению с образцами исходного СВМПЭ и образцом, содержащим следы ( $10^{-3}$  г) наносеребра.

Выбор наноалмазов (НА) в качестве модификаторов обусловлен тем, что они относятся к углеродным материалам, однако их применение в качестве модификаторов полимерных матриц изучено значительно в меньшей степени по сравнению с другими углеродными наполнителями, такими как углеродное волокно, графит, углеродные нанотрубки, терморасширенный графит и т.д.

Целью работы является исследование влияния природных наноалмазов на свойства и структуру нанокompозитов на основе СВМПЭ.

## II. Объекты и методы исследования

Для изготовления композиций использовали СВМПЭ марки GUR-4150 со средней молекулярной массой  $9,2 \cdot 10^6$  г/моль, средний размер частиц полимера составляет 70–80 мкм. В качестве модификатора структуры полимерной матрицы выбран нанопорошок природного алмаза (ПНА) производства ФНПЦ «Алтай». Нанопорошок из природного алмаза получается измельчением при помощи вибрационной мельницы (в режиме мокрого помола), в которой мелющими элементами служили стальные шарики диаметром 6–11 мм. В качестве исходного сырья использовалась фракция (–40 мкм) микропорошка ПНА.

Образцы полимерных композиционных материалов (ПКМ) получали методом горячего прессования. Пресс-форму нагревали до 180 °С, и выдерживали при этой температуре в течение 20 мин при давлении 10 МПа. Охлаждение производили в пресс-форме.

Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве, модуль упругости определяли по ГОСТ 11262–2017 на испытательной машине “UTS-20K” при комнатной температуре и скорости перемещения подвижных захватов 50 мм/мин на лопатках типа 5. Скорость изнашивания и коэффициент трения определяли на универсальном трибометре UMT-2 фирмы CETR (ГОСТ 11629–75, ГОСТ Р 50-54-62–88) по схеме «палец-диск», контртело – сталь твердостью 45–50 HRC и шероховатостью  $Ra=0,06–0,07$  мкм. Режим трения: нагрузка 150 Н, линейная скорость скольжения 0,5 м/с.

Порошковые композиции получали смешиванием в лопастном смесителе. Концентрация НА варьировалась от 0,025 до 1 мас. %, такое количество для наполнения СВМПЭ выбрано для того чтобы выявить, с какой концентрации НА начинает проявляться их максимальная модифицирующая активность.

## III. Обсуждение результатов

Результаты физико-механических и триботехнических исследований ПКМ на основе СВМПЭ, модифицированных ПНА, приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Физико-механические и триботехнические характеристики ПКМ на основе СВМПЭ, наполненных ПНА

Состав	C, мас. %	$\epsilon_p$ , %	$\delta_p$ , МПа	$I$ , мг/ч	$f$
СВМПЭ	-	280±10	36±2	0,160±0,022	0,38±0,01
СВМПЭ + ПНА	0,025	350±10	41±2	0,037±0,012	0,37±0,01
	0,05	335±10	42±2	0,033±0,013	0,36±0,01
	0,5	320±10	44±3	0,027±0,010	0,35±0,01
	1,0	330±10	41±2	0,117±0,019	0,35±0,02

Примечание: C – концентрация, %;  $\epsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве, %;  $\delta_p$  – предел прочности при растяжении, МПа;  $I$  – скорость массового изнашивания, мг/ч;  $f$  – коэффициент трения.

Показано, что деформационно-прочностные показатели композитов улучшаются вне зависимости от концентрации наполнителя. Максимальное значение относительного удлинения при разрыве наблюдается при введении НА в количестве 0,025 мас. %, при этом значения предела прочности при растяжении в пределах погрешностей постоянны.

Считается, что при малой концентрации наполнителя в ПКМ граничные слои удаленных друг от друга частиц наполнителя не представляют собой топологически выделенной в объеме композита самостоятельной фазы, способной оказывать влияние на свойства полимерной матрицы. Однако то, что максимальные повышения деформационно-прочностных показателей зарегистрированы при содержании наполнителя от 0,025 до 0,5 мас. % НА в полимерной матрице, можно объяснить эффектом межструктурного наполнения, когда наночастицы располагаются по границам раздела надмолекулярных образований в аморфных областях, влияя на молекулярную подвижность макромолекул [10].

Из таблицы 1 видно, что максимальное повышение износостойкости зарегистрировано при модификации СВМПЭ 0,5 мас. % ПНА. Достигнуто снижение скорости массового изнашивания в 6 раз по сравнению с исходной матрицей. Это можно объяснить тем, что нанопорошок ПНА состоит из частиц, имеющих преимущественно пластинчатую форму, и в случае непосредственного «выхода» наполнителя на поверхность композита в результате трения частицы ПНА оказывают пластифицирующее действие [11], тем самым уменьшается сила трения, что приводит к снижению как скорости массового изнашивания, так и коэффициента трения по сравнению с ненаполненным СВМПЭ.

Для объяснения подобного изменения свойств композитов были проведены структурные исследования методом РЭМ. На рис. 1 представлены микрофотографии надмолекулярных структур СВМПЭ и ПКМ на его основе при 300-кратном увеличении.

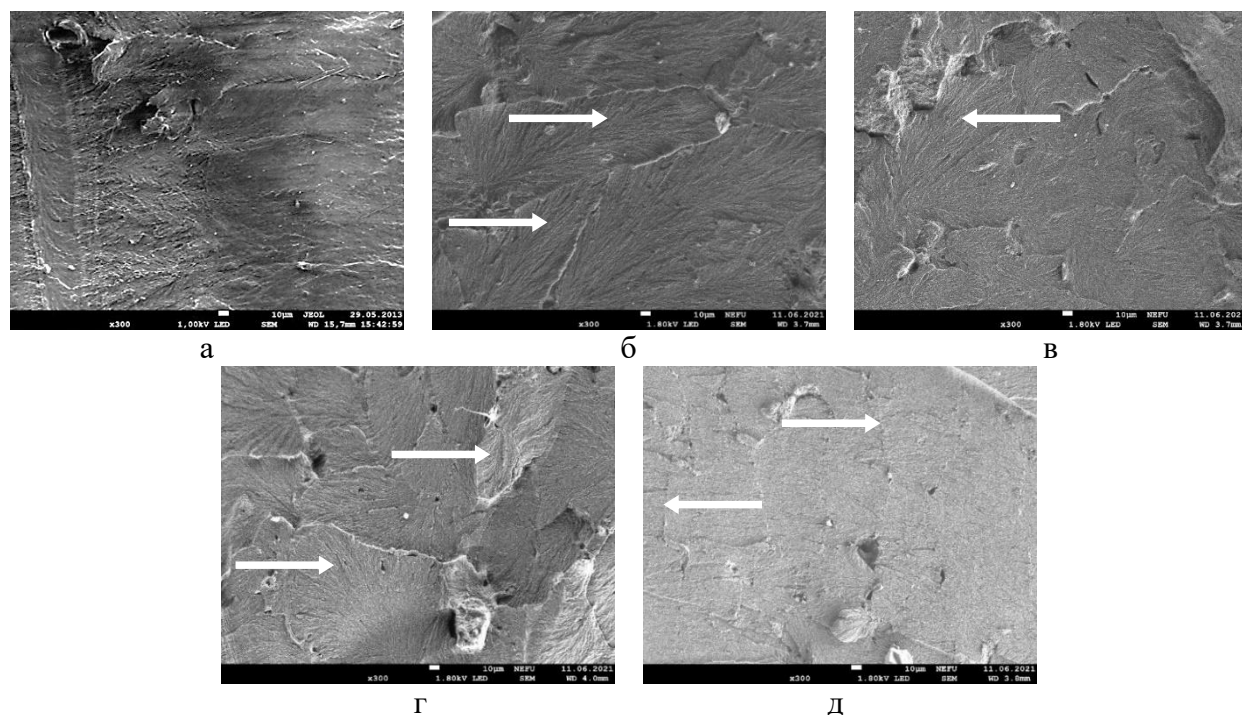


Рис. 1. Надмолекулярная структура: а) СВМПЭ; б) СВМПЭ + ПНА 0,025 мас. %; в) СВМПЭ + ПНА 0,05 мас. %; г) СВМПЭ + ПНА 0,5 мас. %; д) СВМПЭ + ПНА 1 мас. %.

Видно, что при модифицировании СВМПЭ частицами ПНА происходит трансформация исходной фибриллярной структуры СВМПЭ (рис.1а) в транскристаллическую, зарегистрировано образование плотноупакованных столбчатых кристаллитов (рис. 1б, 1в, 1г). На микрофотографии можно наблюдать межкристаллитный

излом, который возникает вследствие низкой адгезионной прочности в межфазных границах СВМПЭ – наполнитель, из-за присутствия на них повышенного количества частиц ПНА, имеющих слабую адгезию к полимерной матрице (рис. 1д).

#### IV. Заключение

Установлена перспективность использования природных наноалмазов в качестве наполнителей СВМПЭ, существенное улучшение исследованных показателей достигается при модифицировании от 0,05 до 0,5 мас.%. Разработаны полимерные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с улучшенным комплексом эксплуатационных показателей.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант № 13.ЦКП.21.0016.

#### Библиографический список

1. Андреева И. Н., Веселовская Е. В., Наливайко Е. И. [и др.]. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности // Л.: Химия. 1982. 80 с.
2. Валугева М. И., Железина Г. Ф., Гуляев И. Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 6. С. 23–29.
3. Селютин Е. Г., Гаврилов Ю. Ю., Воскресенская Е. Н. [и др.]. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. № 18. С. 375–388.
4. Валугева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (97). С. 49–57.
5. Галибеев С. С., Хайруллин Р. З., Архиреев В. П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. 2008. № 2. С. 50–55.
6. Водяков В. Н. Оптимизация режимов механоактивации сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7 // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 4. С. 576–593.
7. Mohammed A. S. UHMWPE Nanocomposite Coatings Reinforced with Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nanoparticles for Tribological Applications // Coatings. 2018. Vol. 8, Is. 8. P. 280.
8. Охлопкова А. А., Никифоров Л. А., Гоголева О. В. Модификация сверхвысокомолекулярного полиэтилена слоистыми глинами // Материаловедение. 2014. №1. С. 45–49.
9. Краснов А. П., Мить В. А., Афоничева О. В. [и др.]. Трение нанокомпозитов серебросодержащего сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вопросы материаловедения. 2009. № 1 (57). С. 161–169.
10. Гуль Б. Е, Кулезнев В. П. Структура и механические свойства полимеров. // М.: Лабиринт. 1994. 367 с.
11. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. [и др.]. Основы трибологии (трение, износ, смазка). 2–е изд. переработ, и доп. // М.: Машиностроение. 2001. 664 с.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 16.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. С. Колесова, О. В. Гоголева, 2023

*Б.С. Кудряшов<sup>1,2</sup>, А.Е. Резванова<sup>1</sup>, А.Н. Пономарев<sup>1</sup>, М.В. Петрухин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

## **ФАЗОВЫЙ СОСТАВ БИОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА**

**Аннотация.** Проведены рентгеноструктурные исследования фазового состава двух серий образцов биокерамики на основе гидроксиапатита (ГА). Установлено, что керамические ГА образцы как с добавками многостенных углеродных нанотрубок, так и без добавок имеют трёхфазную структуру, содержащую в себе, помимо фазы ГА, также фазы альфа-трикальцийфосфата ( $\alpha$ -ТКФ) и бета-трикальцийфосфата ( $\beta$ -ТКФ).

**Ключевые слова:** биокерамика, гидроксиапатит, многостенные углеродные нанотрубки, трикальцийфосфат, фазовый состав.

### **I. Введение**

В настоящее время ведутся работы по созданию материалов имплантатов для реконструкции костных тканей и замещения костных дефектов. Материал имплантата должен соответствовать такому требованию, как биосовместимость с человеческой костной тканью, а также обладать механическими характеристиками, близкими с механическими свойствами кости [1–3].

Гидроксиапатит (ГА), относящийся к биоматериалам из ортофосфатов кальция, обладает превосходной биосовместимостью, биологической активностью и остеокондуктивностью, что делает его применимым при изготовлении костных имплантатов для ортопедической и стоматологической медицины [4–6]. При этом применение ГА в качестве материала для костного имплантата ограничено его низкими механическими свойствами, которые существенно ниже, чем у естественной костной ткани.

Одной из перспективных упрочняющих добавок для улучшения механических характеристик биокерамики на основе ГА являются многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Показано, что содержание нанотрубок в ГА керамике приводит к увеличению плотности композитов ГА-МУНТ, активируя процесс спекания в композитном материале [2].

Известно, что на физико-механические свойства материалов оказывают влияние такие факторы, как их структура и фазовый состав. Поэтому перед исследованием механических свойств керамики ГА-МУНТ необходимо провести промежуточное изучение фазового состава материала, чтобы удостовериться в том, что полученный материал содержит все фазы, соответствующие его эталону.

### **II. Постановка задачи**

Целью настоящей работы является исследование фазового состава композитной керамики ГА-МУНТ, а также проведение количественного анализа параметров тонкой кристаллической структуры.

### **III. Обсуждение результатов**

В работе методом рентгеноструктурного анализа проведены исследования фазового состава двух серий керамических образцов: ГА без добавок (серия №1) и ГА с добавлением 0,5 масс.% МУНТ (серия №2).

Рентгеноструктурные исследования керамики осуществлялись в медном излучении с длиной волны  $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$  и шагом  $0,05^\circ$ . Идентификация фазового состава для каждого образца проводилась с помощью эталонных данных и программного обеспечения Match!

Было установлено, что образцы керамики обеих серий обладают многофазным составом. Помимо гексагональной и моноклинной фаз ГА обнаружены моноклинная фаза альфа-трикальцийфосфата ( $\alpha$ -ТКФ) и ромбоэдрическая фаза бета-трикальцийфосфата ( $\beta$ -ТКФ). Соотношение фазового состава в образцах керамики представлено в таблице 1.

Таблица 1

**Процентное содержание фаз**

Серия образцов	Состав образцов	Содержание ГА, %	Содержание $\alpha$ -ТКФ, %	Содержание $\beta$ -ТКФ, %
1	ГА	32,9	5,77	61,54
2	ГА- 0,5 масс.% МУНТ	32,9	5,77	61,54

Для керамических образцов обеих серий содержание фаз оказалось одинаковым, введение добавок МУНТ не привело к изменению процентного соотношения содержания фаз.

**IV. Заключение**

Объектом рентгеновских исследований выступали две серии керамических образцов на основе гидроксипатита (ГА): серия №1 – ГА без добавок, серия №2 – ГА с добавлением 0,5 масс.% МУНТ. Методом рентгеноструктурного анализа был определён фазовый состав исследуемых образцов. Обнаружено, что образец ГА без добавок (серия №1) содержит в себе гексагональные фазы ГА, а также моноклинную фазу альфа-трикальцийфосфата ( $\alpha$ -ТКФ) и ромбоэдрическую фазу бета-трикальцийфосфата ( $\beta$ -ТКФ). Образец ГА-0,5 масс.% МУНТ (серия №2) отличается от серии №1 моноклинная фаза ГА, что подтверждено сравнением с эталонными данными и идентификацией в программе Match!. Процентное соотношение фаз для образцов серий №1 и №2 друг от друга не отличается.

Научный руководитель: Пономарёв Александр Николаевич, к.ф.-м.н., снс, заведующий ЛМИиФ ИФПМ СО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема №FWRW-2022-0002.

**Библиографический список**

1. Lahiri D., Ghosh S., Agarwal A. Carbon nanotube reinforced hydroxyapatite composite for orthopedic application: a review // *Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. 32. P. 1727–1758. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.05.010>.
2. Moussy F. Biomaterials for the developing world // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2010. Vol. 94. P. 1001–1003. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.32866>.
3. Suchanek W., Yoshimura M. Processing and properties of hydroxyapatite-based biomaterials for use as hard tissue replacement implants // *Journal of Materials Research*. 1998. Vol. 13. P. 94–117. <https://doi.org/10.1557/JMR.1998.0015>.
4. Баринов С. М., Комлев В. С. Биокерамика на основе фосфатов кальция. // *Наука*. 2005. 204 с.
5. Fiume E., Magnaterra G., Rahdar A. [et al.]. Hydroxyapatite for biomedical applications: A short overview // *Ceramics*. 2021. Vol. 4. P. 542–563. <https://doi.org/10.3390/ceramics4040039>

6. Barabashko M. S., Tkachenko M. V., Neiman A. A. [et al.]. Variation of Vickers microhardness and compression strength of the bioceramics based on hydroxyapatite by adding the multi-walled carbon nanotubes // Applied Nanoscience. 2020. Vol. 10. P. 2601–2608. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01019-z>.

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Б.С. Кудряшов, А.Е. Резванова, А.Н. Пономарев, М.В. Петрухин, 2023

УДК 543.422.3-74

*А. В. Мамонтова, Н. Г. Эйсмонт*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ МАТЕРИАЛОВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ**

**Аннотация.** В статье приводится сравнительный анализ ИК-спектров образцов, представляющих собой фрагменты уплотнительных колец из композитов на основе политетрафторэтилена разных производителей и эксплуатировавшихся в разных условиях. Обнаружено появление линии, соответствующей тройной связи атома углерода с азотом в ИК-спектре у всех образцов, бывших в употреблении, а также появление полос, соответствующих связи углерода с серой, в образцах, отработавших на установках, на которых в состав водородсодержащего газа входил в незначительных количествах сероводород.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, уплотнительные кольца, ИК-спектрометрия, газоперекачивающие насосы.

### **I. Введение**

Надежность используемого оборудования играет огромную роль в организации бесперебойного производственного процесса. Частый выход из строя и ремонт приводят к простоям и потере прибыли. Поэтому для производителей всегда актуален вопрос о том, как определить некие маркеры, по которым можно судить о разрушении материала или даже заранее спрогнозировать срок службы оборудования. В данном исследовании речь идет о таких «расходниках», как уплотнительные кольца для поршней насосов. Срок их службы до замены колеблется в пределах от 50 до 5000 часов работы, после чего работу насоса необходимо останавливать и производить замену уплотнителя.

### **II. Постановка задачи**

Уплотнители поршневых колец насосов, перекачивающих водородсодержащий газ (ВСГ) на нефтеперерабатывающем предприятии, изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с добавлением кокса и других наполнителей.

ПТФЭ обладает высокой стойкостью к работе в агрессивных средах [1], но имеет ряд недостатков, которые устраняют введением наполнителей различной природы [2].



Наполнители позволяют обеспечить требуемый уровень эксплуатационных свойств композитов на основе ПТФЭ.

При этом точный химический состав используемых для материалов колец наполнителей, их количественное содержание и технологии изготовления ПКМ засекречены и отличаются у разных производителей. Это значительно затрудняет анализ причин разрушения колец при эксплуатации.

Для выявления таких причин, появляющихся в процессе эксплуатации и оказывающих влияние на срок службы изделия, необходимо проведение комплексного исследования структуры и свойств материалов. В этот комплекс входит инфракрасная (ИК) спектроскопия, проведенная для образцов материалов фрагментов пяти уплотнительных колец (как новых, так и разрушившихся после использования в разных насосах).

В таблице 1 представлены марки материалов объектов данного исследования.

Таблица 1

**Материалы уплотнительных колец**

Образец	А	В	С	Д	Е
Марка ПКМ, состояние кольца	Ф4К20, б/у	Ф4К20, новый	Ф4К20, б/у	Хербигер, б/у	Хербигер, б/у
Срок эксплуатации колец до разрушения, ч	2000	-	80	2000	2000
Установка, на которой происходила эксплуатация образца	№ 1	-	№ 2	№ 1	№ 2

Три образца были изготовлены из известного ПКМ марки Ф4К20 [2], в состав которого входит 80 масс.% ПТФЭ марки Ф4 и 20 масс.% кокса; химический состав композита на основе ПТФЭ марки «Хербигер» двух колец неизвестен.

Исследование данных образцов методом инфракрасной спектроскопии проводилось на установке Инфралюм ФТ-801. В качестве исследуемого материала использовалась стружка, предварительно срезанная с рабочей поверхности уплотнительного кольца.

### III. Результаты

На рис. 1 представлены ИК-спектры пропускания образцов уплотнительных колец из ПТФЭ в диапазоне от 500 до 4000  $\text{см}^{-1}$ .

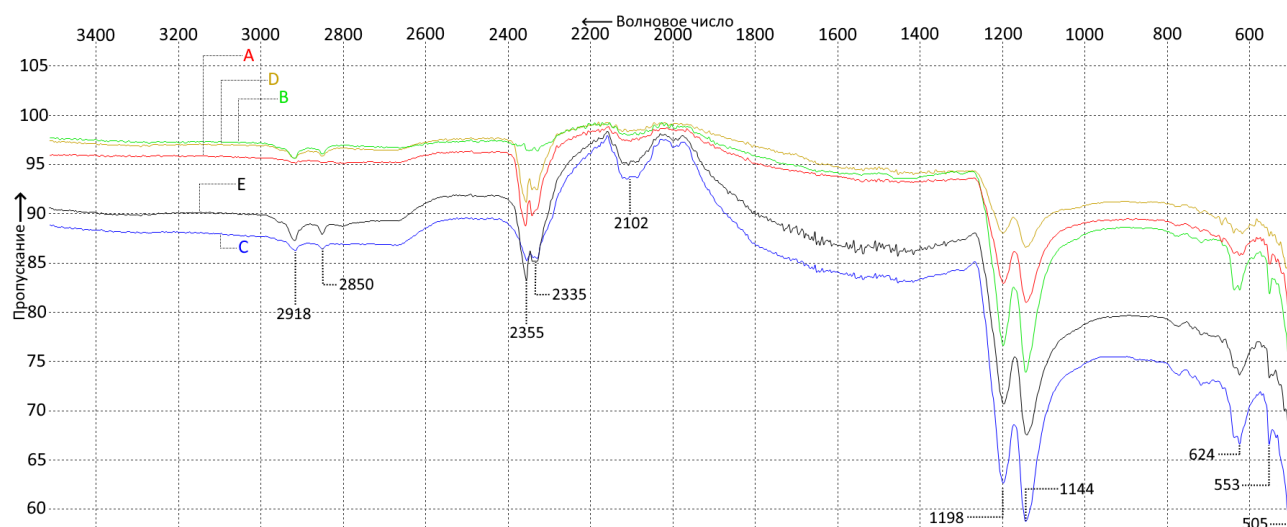


Рис. 1. ИК – спектры образцов материалов фрагментов уплотнительных колец из ПТФЭ (сверху вниз): В, Д, А, Е, С

В отличие от ИК-спектров чистого политetraфторэтилена, описанных в различных источниках, например [1, 3], в данном случае в спектрах пропускания наблюдается несколько дополнительных полос. Полоса, соответствующая волновому числу в диапазоне 2800–3000  $\text{см}^{-1}$ , характерна для связи углерода с водородом. Наличие водорода обусловлено прямым контактом уплотнительного кольца с ВСГ. Интересно, что образец А характеризуется наименьшей концентрацией водорода (пик практически отсутствует), причины данного явления неизвестны, и, можно предположить, связаны с наибольшим среди всех образцов содержанием азота.

Полоса поглощения, соответствующая волновому числу 2350  $\text{см}^{-1}$ , характерна для тройной связи углерода с азотом. Кроме того, такая полоса может появиться и как следствие поглощения углекислого газа (содержащегося в атмосфере) в ходе экспериментальных измерений, но тогда она должна быть слабовыраженной, примерно одинаковой по интенсивности для всех образцов, так как измерения проводились при одинаковых условиях. В нашем случае высота пика может характеризовать концентрацию азота, который накапливается в образцах в процессе эксплуатации. Можно предположить, что чем дольше срок службы образца, тем больше в нем азота и, соответственно, глубже пик. В исследуемых спектрах появились линии, указывающие на наличие связи между атомами углерода и азота. Так, в новом образце (В) таких линий практически нет, в образце С, отработавшем 80 часов, линия, соответствующая связи углерода с азотом, слабая, а в образцах А, D, E, отработавших по 2000 часов, линия более ярко выражена и примерно одинакова по интенсивности. Вероятнее всего, азот попал в поры материала уплотнительных колец во время эксплуатации, т.к. находился в прямом контакте с ВСГ, где азот содержится в качестве примеси в процентном содержании от 0,5 до 2 % от общей массы газа.

Ярко выраженная широкая полоса поглощения, соответствующая волновому числу в диапазоне 2050–2150  $\text{см}^{-1}$ , наблюдалась у образцов С и E, которые эксплуатировались на установке №2. Такая полоса характерна для связи углерода с серой, атомы которой, вероятно, встроились в цепочку ПТФЭ между атомами углерода. Присутствие серы в спектре обусловлено составом ВСГ, где сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) содержится в качестве незначительной примеси (менее 1 % массы) на установке № 2.

Наиболее интенсивные полосы полученных ИК-спектров относятся к валентным колебаниям групп  $\text{CF}_2$  (1143 и 1199  $\text{см}^{-1}$ ). В области ниже 670  $\text{см}^{-1}$  располагаются деформационные колебания групп  $\text{CF}_2$  [4]. Эти полосы наблюдались у всех исследуемых образцов, но имели несколько отличающуюся интенсивность. Это может быть связано с тем, что несколько отличались давления, оказываемые на образцы при их фиксации на подложке, так как при наложении давления на образец политetraфторэтилена существенно уменьшаются интенсивности спектральных полос при 1210 и 640  $\text{см}^{-1}$  [4].

#### IV. Заключение

Образцы фрагментов уплотнительных колец из ПТФЭ, как новые, так и бывшие в употреблении и разрушившиеся, работавшие в среде ВСГ, исследованы методом ИК-спектроскопии. Спектры обработаны и сравнены. Сделаны выводы о появлении связи между атомами углерода и азота в отработавших образцах. Также выявлена связь углерода с серой в образцах, работавших на установках, где в состав ВСГ входил сероводород.

Из полученных результатов видно, что ИК-спектры разных образцов поршневых колец до и после эксплуатации в разных условиях отличаются. Проведенный качественный анализ и выявленные химические связи не позволяют сделать однозначный вывод о влиянии установленных связей на работоспособность поршневых колец из рассматриваемых материалов и прогнозировать срок их службы, необходим дополнительный количественный анализ.

Предположительно, состав ВСГ негативно влияет на срок службы уплотнительных колец некоторых производителей, но для выявления причин разрушения и проверки выдвинутых гипотез необходимы дополнительные исследования структуры и свойств материалов.

### **Благодарности**

Авторы благодарят Евгения Анатольевича Рогачева за помощь в проведении эксперимента, Егорову Викторию Александровну и Даньшину Валентину Владимировну за помощь в интерпретации полученных результатов.

### **Библиографический список**

1. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И. [и др.]. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М.: Машиностроение, 2005. 240 с.
2. Егорова В. А. Повышение эффективности структурной модификации политетрафторэтилена скрытокристаллическим графитом путем ограничения теплового расширения при спекании: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2008. 156 с.
3. Дехант И., Данц Р., Киммер В. [и др.]. Инфракрасная спектроскопия полимеров. М: Химия, 1976. 472 с.
4. Бузник В. М., Игнатьева Л. Н. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм // Российский химический журнал. Т. LI. № 3. 2008. С. 139–146.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 01.06.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. В. Мамонтова, Н. Г. Эйсмонт, 2023

УДК 678:073:661:481

*М. А. Маркова, П. Н. Петрова*

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

**Аннотация.** Представлены результаты исследований влияния технологии пластической деформации готовых полимерных заготовок на основе политетрафторэтилена на их физико-механические показатели. Показано, что использование технологии пластического деформирования полимерных заготовок, сопровождающееся формоизменением, позволяет в значительной степени не только повысить прочность, но и снизить ползучесть политетрафторэтилена и композитов на его основе с углеродными волокнами марки УВИС-АК-П.

**Ключевые слова:** полимерный композит, политетрафторэтилен.

### **I. Введение**

Известно, что применение политетрафторэтилена (ПТФЭ) и ПТФЭ-композитов ограничено из-за наличия таких недостатков как относительно низкая прочность и высокая

ползучесть (хладотекучесть) как при растягивающих усилиях, так и при сжатии. Существует множество различных способов устранения этих недостатков, преимущественно путем модифицирования ПТФЭ различными наполнителями. Однако использование даже армирующих волокнистых наполнителей не всегда позволяет добиваться необходимого улучшения физико-механических свойств получаемых композитов при повышении их износостойкости. В составе трибосопряжений под действием нагрузочно-скоростных воздействий полимерные композиционные материалы (ПКМ) испытывают различного вида напряжения, деформации, приводящие к возникновению и накоплению дефектов, влияющих на их работоспособность и износостойкость. В связи с этим до сих пор актуальными остаются исследования, связанные с поиском новых эффективных технологических способов улучшения прочностных свойств ПТФЭ и композитов на его основе. Одним из способов получения композитов с повышенной прочностью и сниженной ползучестью является твердофазная структурная модификация полимеров, основанная на процессах пластической деформации, направленная на создание высокоориентированного состояния. Все многообразие методов твердофазной молекулярной ориентации можно разделить:

- на методы, основанные на деформировании полимерной заготовки, сопровождающемся ее формоизменением (вытяжкой);
- на процессы, основанные на интенсивной пластической деформации (ИПД), осуществляемой в условиях простого сдвига, не связанных с изменением формы и размеров полимерных заготовок [1].

## II. Объекты, технологии получения и методы исследований

Заготовки изготовлены из ПТФЭ марки ПН (ГОСТ 10007-80), а также из полимерных композитов, содержащих углеродные волокна (УВ) марки УВИС-АК-П в количестве 5 мас.%, полученных с использованием метода поэтапного введения наполнителя через концентрат, где соотношение системы «концентрат-полимер» составляло 50/50, а также с использованием совместной механической активации компонентов при скорости вращения барабанов 400 об/мин в течение 2 минут.

Ранее разработана технология, основанная на применении пластического деформирования предварительно нагретых до 200–210 °С полимерных заготовок под давлением, сопровождающемся изменением толщины при постоянстве ширины заготовки (технология №1) (рис. 1) [2]. Использование разработанной технологии приводит к повышению предела прочности при растяжении ПТФЭ и его композитов с УВ в 2,7–3,3 раза и снижению деформации ползучести в 22–29 раз по сравнению с ПТФЭ, полученным по стандартной технологии.

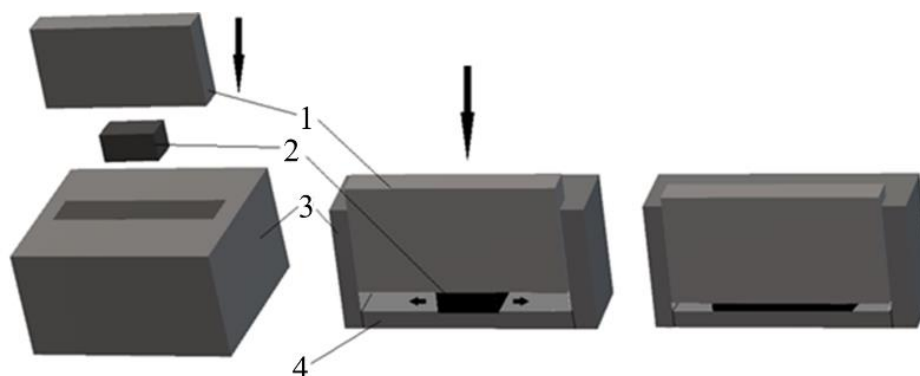


Рис. 1. Внешний вид прессформы (а), этапы сжатия образца (представлено в разрезе): до сжатия (б); после сжатия (в). Обозначения: 1 – верхний пуансон, 2 – образец, 3 – матрица, 4 – нижний пуансон (технология №1)

На текущем этапе выполнения работы разработана новая технология (технология №2), также основанная на пластической деформации полимерной заготовки, сопровождающейся ее формоизменением. Сущность технологии №2 пластического деформирования состоит в следующем: предварительно нагретая до 200–210 °С полимерная заготовка под давлением сжимается до достижения 1/5 от исходной толщины, при этом происходит как изменение толщины, так и ширины полимерной заготовки (рис. 2). После сжатия образец охлаждается под давлением до комнатной температуры.

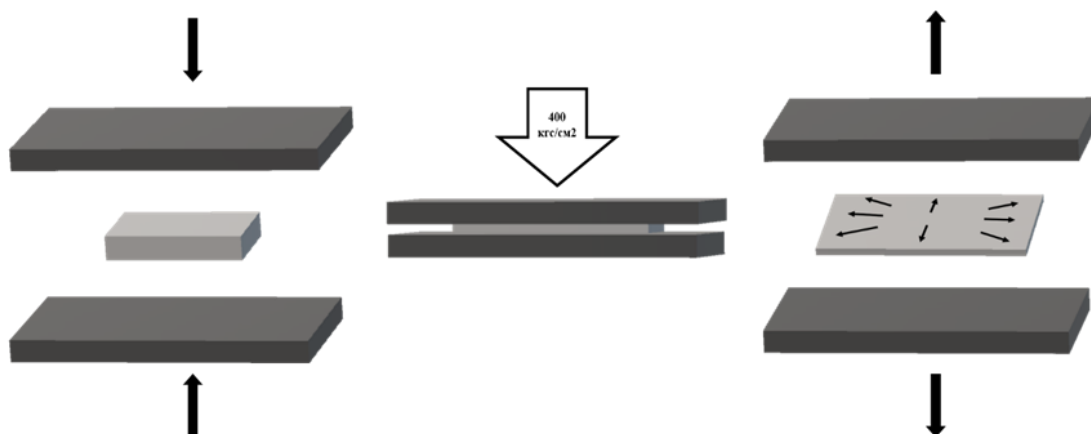


Рис. 2. Схема деформирования полимерной заготовки на основе ПТФЭ (технология №2)

Преимущество технологии №2 состоит в том, что нет необходимости в использовании специальной пресс-формы, как при использовании технологии №1, достаточно прессы, обеспечивающего необходимое усилие до 400 кгс/см<sup>2</sup>. В данном случае использован пресс гидравлический вулканизационный 100-400 2Э, дополнительным плюсом которого является подогрев плит прессы, что облегчает процесс деформирования полимерного материала.

Полученные таким образом образцы подвергались следующим испытаниям: определение физико-механических свойств по ГОСТ 11262-80 на испытательной машине UTS-20К при комнатной температуре и скорости перемещения подвижных захватов 50 мм/мин, ползучесть определялась по ГОСТ 18197-2014. Исследование надмолекулярной структуры полученных ПКМ проводили на низковакуумном растровом электронном микроскопе JSM-6480LV фирмы «JEOL».

### III. Обсуждение результатов

На поведение ПКМ при разрушении влияет большое количество факторов: характеристики дисперсной и матричной фаз, состояние дисперсной фазы, содержание дисперсной фазы и т.д. ПКМ могут вести себя при разрушении как хрупкие, так и как вязкоупругие материалы. В связи с этим проведено сравнение кривых «нагрузка-деформация» для ПТФЭ и ПКМ, полученных с использованием разных технологий деформирования, и определены пределы их прочности и текучести при растяжении (рис. 3). Наиболее важной характеристикой для полимерных материалов является значение предела текучести (при одноосном растяжении), т.к. оно указывает на предельное состояние материала, по достижении которого в материале возникают необратимые деформации. Под пределом текучести понимается то напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки. Таким образом, определение предела текучести у полимерных материалов необходимо для определения допустимого (безопасного) напряжения, которое может выдержать материал детали [3–5].

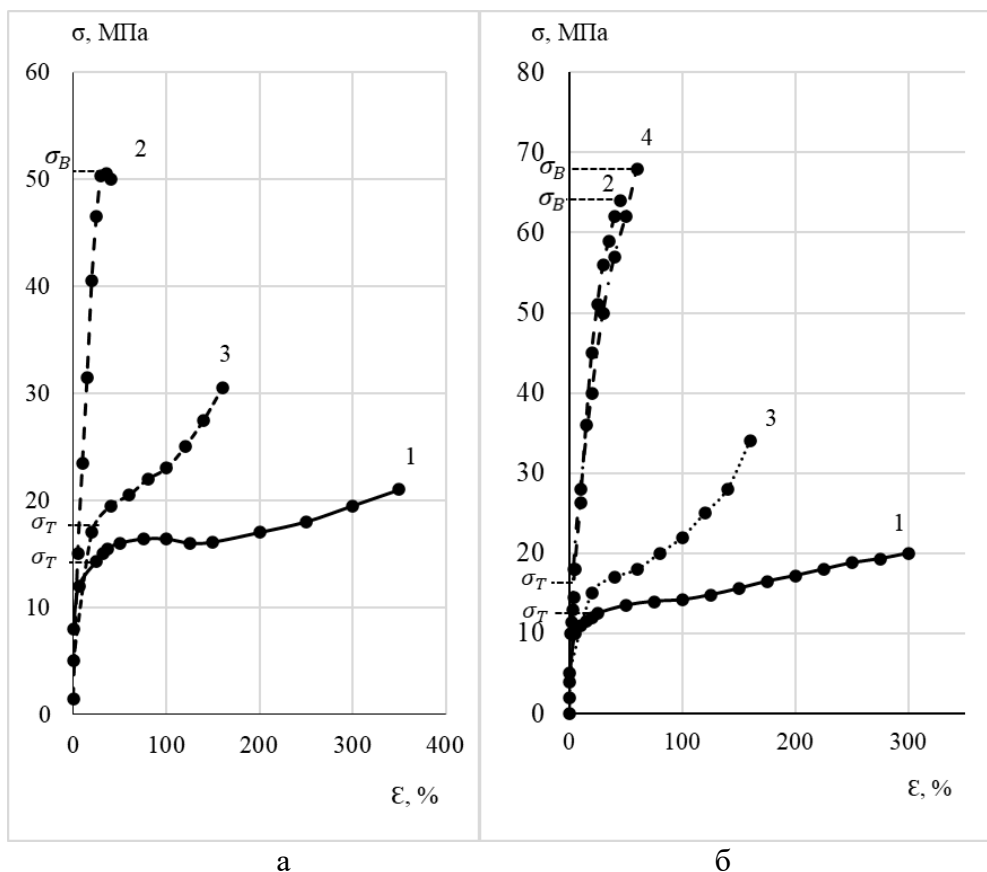


Рис. 3. Зависимость деформация–растяжение  $\epsilon$  ПТФЭ (а) и ПКМ с УВИС-АК-П (б) в зависимости от технологии получения: 1 – стандартная технология; 2 – пластическая деформация №1; 3 – пластическая деформация №2; 4 – пластическая деформация №1 закаленного ПТФЭ

Как видно из рис. 3, кривые «напряжение–относительное удлинение» для ПТФЭ и ПКМ на его основе отличаются по характеристикам прочности и пластичности в зависимости от технологии получения. Для исходного ПТФЭ, полученного по стандартной технологии, деформационная кривая от нагрузки не имеет явно выраженного предела текучести (пластичности), то есть не наблюдается образования «шейки» (рис. 3а, кривая 1). Образцы ПТФЭ вытягиваются по всей длине рабочей части лопатки вплоть до разрыва за счет пространственно однородного сдвига полимерных цепей, таким образом осуществляется режим пластической деформации при растяжении. Деформационная кривая ПКМ, полученная без применения технологии деформирования, характеризуется наличием «шейки» небольшой амплитуды (рис. 3б, кривая 1), соответствующей состоянию пластической неустойчивости, и дальнейшее растяжение образца происходит именно за счет удлинения «шейки». В этом случае разрушению предшествует вынужденная высокоэластическая деформация, развивающаяся в полимерном композите при достижении предела текучести, которая и принимается за прочность ПКМ. Разрушающее напряжение  $\sigma_p$  получается больше по значению, т.к. в процессе вытяжки материал упрочняется. На первой стадии деформирования ПТФЭ и ПКМ является линейно-упругим, вторая характеризуется нелинейностью связи напряжение-деформация и необратимостью деформирования. Пределы прочности при растяжении ( $\sigma_p$ ) и условные пределы текучести ( $\sigma_T$ ), определенные исходя из деформационных кривых, составляют:  $\sigma_p = 19$ – $20$  МПа,  $\sigma_T \sim 11$ – $12$  МПа для исходного ПТФЭ, для ПКМ:  $\sigma_p = 20$ – $21$  МПа,  $\sigma_T \sim 15$ – $16$  МПа.

Характер деформационной кривой ПТФЭ и ПКМ, полученной с использованием технологии пластического деформирования №1, существенно отличается (рис. 3а, 3б,

кривая 2, кривая 4). Она лежит намного выше, чем для исходного ПТФЭ и ПКМ, полученных по стандартной технологии, и это означает, что данные материалы характеризуются повышенными значениями модуля упругости, вязкости и сниженной ползучестью. Деформационная кривая соответствует зависимости для жестких полимерных материалов, таких как ПС, ПК, ПММА и т.д., которые при нагружении испытывают в основном упругие деформации, незначительное превышение которых вызывает разрушение материала. В этом случае  $\sigma_p$  ( $\sigma_{кр}$ ) является пределом прочности, который соответствует 62–67 МПа для ПТФЭ и 50–52 МПа для ПКМ. При этом следует отметить, что характер кривой одинаковый как для образцов ПТФЭ, независимо от метода их получения (рис. 3а, кривая 2, кривая 4), так и композита на его основе с УВ (рис. 3б, кривая 2). Таким образом, можно утверждать, что значительное повышение прочности и снижение ползучести для этих материалов обеспечивает технология их получения, а именно одноосная пластическая деформация полимерных заготовок.

Кривая «нагрузка-деформация» ПТФЭ и ПКМ (рис. 3а, 3б, кривая 3), полученная с использованием технологии пластической деформации №2, по характеру соответствует кривой исходного ПТФЭ и ПКМ, полученных по стандартной технологии, т.е. также осуществляется режим пластической деформации при растяжении. Появление пластичности под нагрузкой, с одной стороны, применительно к реальным деталям свидетельствует об их выходе из строя не вследствие разрушения, а по причине необратимой деформации при определенных напряжениях, а с другой стороны, пластичность обуславливает надежность и безопасность сооружений, повышая их сопротивляемость ударным и усталостным нагрузкам [6]. При растяжении образца выше предела текучести  $\sigma_T$  происходит деформационное упрочнение, вследствие чего значение  $\sigma_p$  выше, чем  $\sigma_T$ . Значение  $\sigma_p$  достигает 34 и 31 МПа для ПТФЭ и ПКМ соответственно, тогда как значения  $\sigma_T$  составляют ~15 и 18 МПа.

Для объяснения изменения свойств полимерного композита на основе ПТФЭ и 5 масс. % УВ проведены структурные исследования на растровом электронном микроскопе JSM-6480LV фирмы JEOL (Япония).

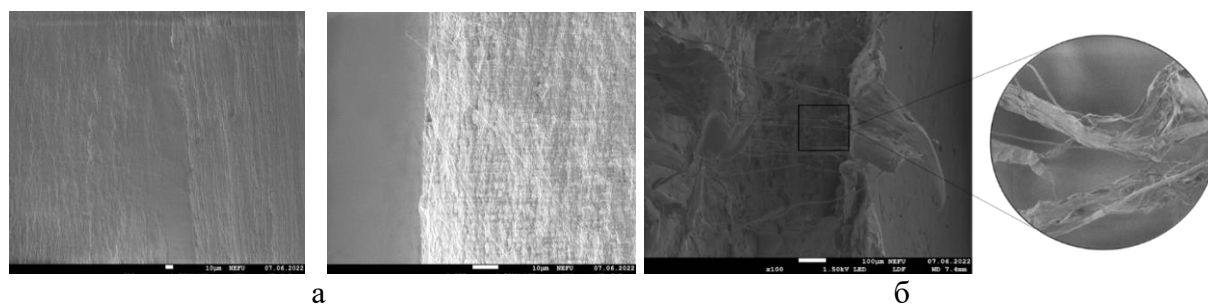


Рис. 4. Надмолекулярная структура ПТФЭ в зависимости от технологии получения  $\times 100$ , 1000, 5000: а) неконтролируемая пластическая деформация; б) контролируемая пластическая деформация

Как видно из рис. 4а, при использовании технологии №2 при малом увеличении (300 раз) структура композита не отличается от структуры ПТФЭ, полученной по стандартной технологии. Однако при пробоподготовке для исследования надмолекулярной структуры ПКМ с использованием азота происходит отслаивание. На микрофотографиях зарегистрировано наличие «ворсинок» ПТФЭ, которые свидетельствуют о наличии макромолекулярной связи. Однако при использовании технологии №1 отслаивание произошло не в полной мере с сохранением некоторых макромолекулярных связей (рис.4, б). Это свидетельствует об образовании более прочной межмолекулярной связи между макромолекулами ПТФЭ.

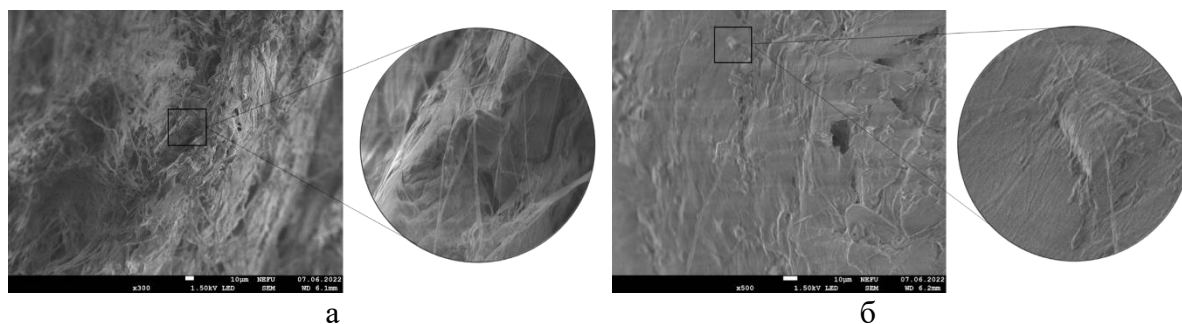


Рис. 5. Надмолекулярная структура ПКМ в зависимости от технологии получения x300, 500, 5000: а) неконтролируемая пластическая деформация; б) контролируемая пластическая деформация

На рис. 5 приведены структуры ПКМ в зависимости от технологии проведения пластической деформации полимерных заготовок. Из рис. 5 видно, что вне зависимости от технологии пластической деформации происходит повышение адгезионного взаимодействия между полимерной матрицей и углеродными волокнами. Частицы волокна полностью покрыты полимером. В этом случае также наблюдается интенсивное вытягивание фибрилл при получении низкотемпературного скола при использовании технологии пластического деформирования №1.

#### IV. Заключение

В результате проведенных исследований показана эффективность использования технологического приема пластической деформации, обеспечивающего существенное повышение прочности и сопротивляемость к ползучести ПТФЭ и ПКМ. Установлено повышение прочности при растяжении до 1,5–3 раз, модуля упругости при растяжении до 1,5 раз, и снижение ползучести в 12–30 раз по сравнению с ПТФЭ, полученным без пластической деформации по стандартной технологии. При этом выявлено, что полимерные заготовки как из ПТФЭ, так и из ПКМ с УВ, полученные путем одноосного деформирования с изменением толщины при постоянстве ширины, характеризуются повышенной прочностью и сопротивляемостью к ползучести по сравнению с технологией пластического деформирования с изменением толщины и ширины образца.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13.ЦКП.21.0016.

#### Библиографический список

1. Пат. 2527782 Российская Федерация, МПК В29С 43/02 (2006.01). Процесс изготовления упрочненных прутковых изделий из аморфно-кристаллических полимеров / Белошенко В. А., Возняк А. В., Возняк Ю. В. № 2013101642/05, заявл. 11.01.2013, опуб.10.09.2014, Бюл. № 25.
2. Пат. 2748692 Российская Федерация, МПК В29С 43/00 (2006.01), С08F 14/26 (2006.01), С08L 27/12 (2006.01). Способ получения изделия из полимерного материала на основе политетрафторэтилена марки Ф-4 ПН, характеризующегося повышенной прочностью и сниженной ползучестью // Попов С. Н., Федоров А. Л., Маркова М. А., Петрова П. Н., № 2020122358, заявл. 30.03.2020, опуб. 28.05.2021, Бюл. № 16.
3. Крыжановский В. К., Бурлов В. В. Пластмассовые детали технических устройств (выбор материала, конструирование, расчет): СПб.: Научные основы и технологии, 2014. 456 с.
4. Крыжановский В. К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс: СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 204 с.



5. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кудьков П. А. [и др.]. Полимерные композиционные материалы (прочность и технология): Долгопрудный: Изд-во Дом «Интеллект», 2010. 352 с.

6. Гольдаде В. А., Пинчук Л. С. Физика конденсированного состояния / под ред. Н. К. Мыщкина. Минск: Беларус. наука, 2009. 657 с.

*Дата поступления статьи: 28.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. А. Маркова, П. Н. Петрова, 2023

УДК 678:073:661:481

*М. А. Маркова, П. Н. Петрова, Р. С. Тихонов*

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ PV-ФАКТОРА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

**Аннотация.** Приведены исследования триботехнических показателей полимерного композита на основе политетрафторэтилена при скорости скольжения контртела от 0,2 до 0,5 м/с для определения PV-фактора с помощью математической модели. В качестве исследуемого материала выбран композит, полученный с использованием технологии вальцевания порошковой смеси, где содержание углеродных волокон составило 7 масс.%. Данный технологический прием приводит к повышению износостойкости в 4–9 раз по сравнению с композитами, полученными с использованием совместной механоактивации компонентов.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, износостойкость, коэффициент трения, скорость изнашивания по массе, углеродные волокна.

### **I. Введение**

Полимерные материалы широко применяются в машиностроении в качестве подшипников скольжения благодаря целому ряду преимуществ, таких как низкий коэффициент трения, агрессивно- и коррозионная стойкость, высокая износостойкость в режиме сухого и полусухого трения. Однако существует проблема их ограниченного использования при высоких нагрузках, поэтому необходимо расширить возможности использования подшипников скольжения на полимерной основе путем повышения их нагрузочной способности, долговечности, износо- и термостойкости и ползучести.

Для конструкций, функционирующих в условиях трения и износа, подходящими материалами являются фторполимерные композиты. Для прогнозирования работоспособности разрабатываемых материалов в узлах трения необходимо исследовать триботехнические характеристики при разных режимах трения.

### **II. Объекты и методы исследований**

В качестве полимерной матрицы выбран политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки ПН (ГОСТ 10007-80). В качестве наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозных углеродных волокон производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия). Триботехнические характеристики (коэффициент трения,

скорость изнашивания по массе, поверхностная температура) в широком диапазоне нагрузок определяли на машине трения ИИ-5018 (ГОСТ Р 50-54-107–88) по схеме трения «диск–диск», имитирующей работу подшипников скольжения. В данной работе приведены результаты триботехнических испытаний полимерных композитов с содержанием углеродных волокон 5–10 мас.%, а также результаты по определению PV-фактора полимерного композита состава ПТФЭ + 7 мас.% УВ, полученного с использованием технологического приема в виде вальцевания порошковой композиции. Вычислительные эксперименты проводились при следующих геометрических размерах: радиус диска из ПКМ составлял 0,027 м, радиус стального диска – 0,023, толщина дисков образца и контртела – 0,012 м, стальной диск жестко закреплен к валу с радиусом 0,015 м, который выступает слева и справа от диска на 0,038 и 0,01 м, соответственно. Определение PV-фактора для разрабатываемых композитов имеет большое значение при оценке практического использования материалов в определенных условиях нагрузки и скорости [1].

### III. Обсуждение результатов

В ранее проведенной работе [2] был исследован материал на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), модифицированного 5 мас.% УВ марки УВИС-АК-П (УВ), полученного по технологии совместной механической активации и введения наполнителя через концентрат (технология №1). Однако при увеличении содержания наполнителя до 7–10 масс.% [3] происходит снижение деформационно-прочностных характеристик, несмотря на незначительное повышение износостойкости. В связи с этим для составов ПТФЭ + 5–7 мас.% УВИС-АК-П апробирована технология пропускания порошковой композиции через вальцы до стадии термообработки (технология №2). Установлено, что использование такого технологического приема приводит к повышению износостойкости композитов в 4–9 раз по сравнению с композитами, полученными с использованием совместной механоактивации компонентов, при этом зарегистрировано некоторое повышение деформационно-прочностных показателей (таблица 1) [4].

Таблица 1

**Зависимость триботехнических показателей ПКМ от технологии получения и режима трения**

Состав	Фактор		Технология получения ПКМ	$I, \text{мг/ч}$	$f$
	$F, \text{Н}$	$v, \text{м/с}$			
ПТФЭ + 5 мас.% УВИС-АК-П	160	0,2	№1	0,44–0,46	0,21
	260	0,2	№1	3,55–3,65	0,21
	550	0,2	№1	5,15–5,25	0,14
	160	0,5	№2	1,20–1,22	0,22
	550	0,5	№2	9,30–9,45	0,17
ПТФЭ + 7 мас.% УВИС-АК-П	260	0,2	№1	3,04–3,07	0,12
	160	0,2	№2	0,10–0,12	0,16
	260	0,2	№2	0,39–0,41	0,11
	550	0,2	№2	2,23–2,25	0,11
	160	0,5	№2	6,27–6,32	0,15
	550	0,5	№2	4,80–4,85	0,17
ПТФЭ + 10 мас.% УВИС-АК-П	260	0,2	№1	1,35–1,37	0,11
	160	0,2	№2	0,50–0,53	0,21
	260	0,2	№2	0,33–0,35	0,16
	550	0,2	№2	4,62–4,67	0,14
	160	0,5	№2	4,25–4,32	0,19
	550	0,5	№2	11,07–11,12	0,18

Примечание: Технология №1 – получение композиции через концентрат и совместная активация; Технология №2 – первая стадия по технологии №1, затем пропускание композиции через вальцы. Эксперименты проведены на машине трения ИИ-5018;  $F$  – сила поджатия ПКМ к стальному контртелу (нагрузка), Н;  $v$  – линейная скорость вращения контртела, м/с;  $I$  – скорость массового изнашивания, мг/ч;  $f$  – коэффициент трения.

Показано, что при малых нагрузках (160–260 Н) износостойкость композита повышается при увеличении концентрации УВ до 10 мас.%. При повышении нагрузки трения до 550 Н и скорости скольжения стального вала установлено, что более износостойкими являются ПКМ с содержанием УВ 7 мас. %, полученные с использованием технологии вальцевания порошковой композиции до стадии термообработки (таблица 1).

Ограничивающими факторами для определения допустимых условий трения полимерных композитов являлись средняя поверхностная температура, которая соответствует 120 °С, коэффициент трения и развитие необратимых деформаций вследствие фрикционного нагрева и нагружения [5].

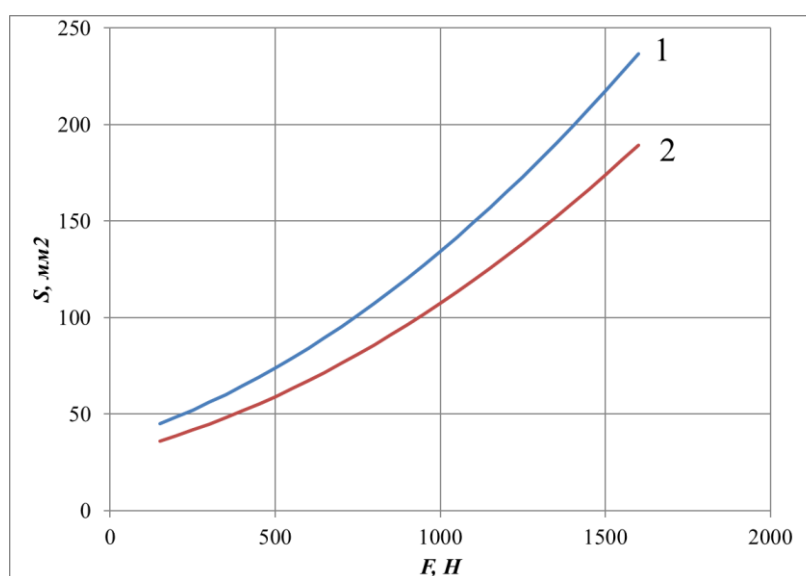


Рис. 1. Площади износа в зависимости от задаваемой нагрузки:  
1 – ПТФЭ + 5 мас. % УВ (технология № 1); 2 – ПТФЭ + 7 мас. % УВ (технология № 2)  
при линейной скорости контртела 0,2 м/с

Для этого сначала адекватность разработанной ранее модели [2] проверена на композите ПТФЭ + 7 мас. % УВ, полученного с использованием технологии вальцевания при нагрузке 650 Н и линейной скорости вращения диска 0,2 м/с. Показано, что разработанная математическая модель может быть использована для оценки температурных полей для составления рекомендаций по практическому применению данного композита (ПТФЭ + 7 мас.% УВ) при разных режимах трения.

С учетом дополненных экспериментальных данных значений площади контакта в процессе трения при нагрузке 650 и 900 Н для скорости вращения контртела 0,2 м/с получены формулы (1) и (2) определения площади контакта для составов ПТФЭ + 5 мас.% УВ и ПТФЭ + 7 мас. % УВ.

$$S = 0,4548 \cdot 10^{-4} \cdot F^2 + 5,263 \cdot 10^{-2} \cdot F + 36,206 \quad (1)$$

$$S = 0,3638 \cdot 10^{-4} \cdot F^2 + 4,21 \cdot 10^{-2} \cdot F + 28,965 \quad (2)$$

Квадратное уравнение выбрано, поскольку для ПКМ площадь износа описывается параболическим уравнением (рис. 1).

На рис. 2 показана поверхность максимальной температуры в зависимости от нагрузки и коэффициента трения при скорости скольжения стального вала 0,2 м/с.

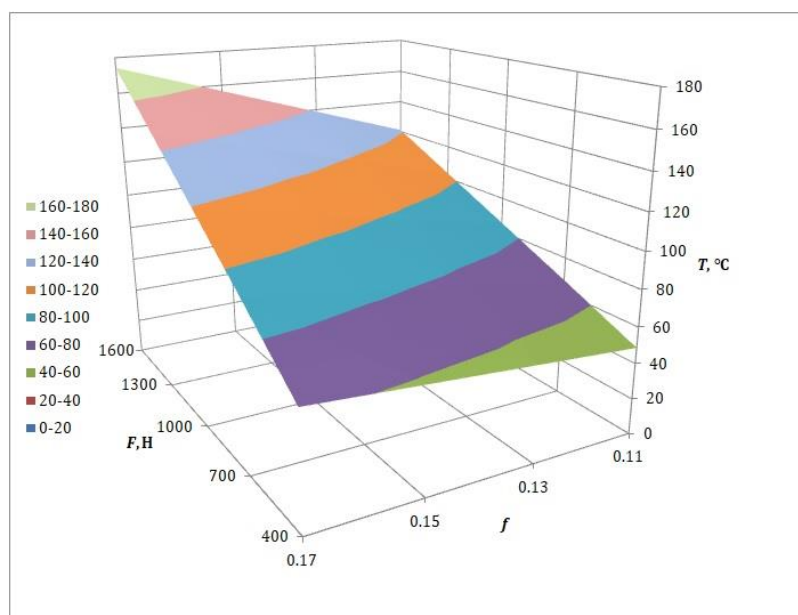


Рис. 2. Поверхность максимальной температуры в зависимости от нагрузки и коэффициента трения

Для этого с использованием разработанной математической модели определены максимальные значения температур в полимерном материале при разных нагрузках  $F$  и коэффициенте трения в интервале его разброса, т.к. значение коэффициента трения материала непостоянно в каждом натурном эксперименте.

Далее с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ) определено уравнение поверхности максимальной температуры, зависящее от значений коэффициента трения  $f$ , нагрузки  $F$  и скорости скольжения  $v$  (таблица 2):

$$T = 23,331 + 4,926 \cdot f - 3,704 \cdot 10^{-6} \cdot F - 0,324 \cdot v + 0,268 \cdot f \cdot F + 38,704 \cdot f \cdot v + 1,852 \cdot 10^{-5} \cdot F \cdot v + 1,399 \cdot f \cdot F \cdot v \quad (3)$$

Для этого вычислительными экспериментами определены температуры на границах интервала переменных в количестве  $2^3=8$ , а также интервалы изменения переменных  $f \in (0,11; 0,17)$ ,  $F \in (400; 1600)$ ,  $v \in (0,2; 0,5)$ . Верхние границы переменных определены из условия расчета  $T < 300$  °С, это условие также исключает в математической модели учет процесса фазового перехода композитов на основе ПТФЭ.

Таблица 2

**Входные данные и выходной параметр для полного факторного анализа**

N	$f$	$F$ , Н	$v$ , м/с	$T$ , °С
1	0,11	400	0,2	48,75
2	0,17	400	0,2	62,65
3	0,11	1600	0,2	121,02
4	0,17	1600	0,2	174,34
5	0,11	400	0,5	68,40
6	0,17	400	0,5	93,07
7	0,11	1600	0,5	196,08
8	0,17	1600	0,5	290,39

Примечание:  $T$  – температура ПКМ на выходе из зоны трения.

Для определения параметров ( $f$ ,  $F$ ,  $v$ ) при условиях нормального функционирования композиционного материала в уравнении (3) ограничиваем максимальную температуру 120 °С.

При исследовании триботехнических свойств ПКМ в зависимости от нагрузки и скоростей скольжения было показано, что вне зависимости от нагрузки коэффициент трения композитов остается на уровне  $f = 0,15-0,20$ . При этом у ПКМ с содержанием 7 мас. % УВ, который характеризуется оптимальными трибологическими показателями, среднее значение коэффициента трения составляет 0,15. В связи с этим на основании данных, приведенных в таблице 2, построены кривые, описывающие предельные рабочие значения параметров  $P$  и  $v$  для полимерного композита при значении коэффициента трения  $f = 0,15$  (рис. 3).

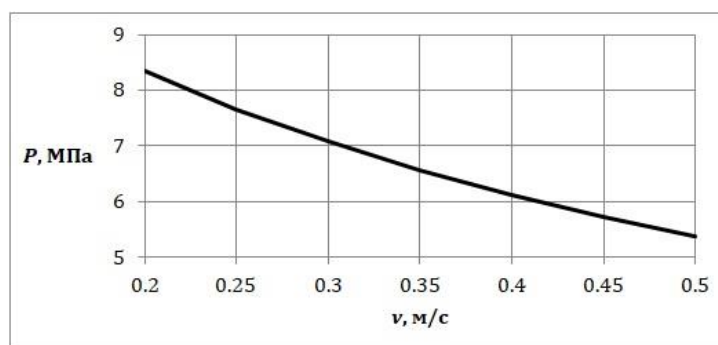


Рис. 3. Кривая зависимости давления в зоне трения от скорости скольжения

С использованием кривой (рис. 3) вычислены предельные значения режимного PV-фактора ПКМ при скоростях скольжения 0,2–0,5 м/с: PV-фактор = 1,7–2,7 МПа·м/с

## VI. Заключение

На основании проведенных триботехнических исследований на машине трения ИИ–5018 по схеме, имитирующей работу подшипников скольжения, определены предельно допустимые значения нагрузочно-скоростного режима трения разработанных композитов при скорости скольжения стального вала в интервале 0,2–0,5 м/с. Установлено, что предельная нагрузка в зоне трения, которую выдержит разработанный композит, при скорости скольжения 0,2 м/с составляет порядка 1150 Н (8,3 МПа), при повышении скорости скольжения до 0,5 м/с она уменьшается в 1,5–1,7 раза. Полученные данные позволяют сформулировать рекомендации по практическому применению разработанных материалов для обеспечения стабильного функционирования металлополимерного узла трения.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13.ЦКП.21.0016

## Библиографический список

1. Крыжановский В. К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс. СПб.: Научные основы и технологи, 2009. 214 с.
2. Петрова П. Н., Маркова М. А., Тихонов Р. С. Триботехнические характеристики полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и углеродных волокон УВИС-АК-П при нагружении // Вестник машиностроения. 2022. № 10. С. 65–70.
3. Markova M. A., Petrova P. N. Influence of the Methods of the Component Activation of Polymer Composites Based on Polytetrafluoroethylene and Carbon Fiber on the Operational Properties // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079, Is. 2. P. 1–6. Doi:10.1088/1757-899X/1079/3/032041.

4. Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л. Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2022. № 15 (5). С. 569–582. Doi: 10.17516/1999-494X-0418.

5. Крыжановский В. К., Бурлов В. В. Платмассовые детали технических устройств (выбор материала, конструирование, расчет). СПб.: Научные основы и технологии, 2014. 456 с.

*Дата поступления статьи: 28.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 15.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. А. Маркова, П. Н. Петрова, Р. С. Тихонов, 2023

УДК 539.3

*И. Л. Панов<sup>1,2,3</sup>, Н. Ю. Гришаева<sup>2</sup>, Б. А. Люкин<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**Аннотация.** Предлагается алгоритм компьютерного конструирования наполненных полимерных композиций с такими эффективными физико-механическими свойствами, для которых заранее заданы двусторонние или односторонние ограничения на их значения. В основу положены результаты ограниченного числа вычислительных и/или физических экспериментов. Метод обладает такими достоинствами, как наглядность представления исходных данных и получаемых рекомендаций, возможность отсека не реализуемых вариантов, когда требования к свойствам материала несовместимы, возможность применения к широкому разнообразию композиций.

**Ключевые слова:** эффективные характеристики, компьютерное конструирование, эксперимент, обратная задача.

### **I. Введение**

Ненаполненные полимеры используются довольно редко, т.к. при всех достоинствах они не устраивают пользователей по многим требованиям – от внешнего вида до физико-механических характеристик. Поэтому зачастую требуется изменение этих свойств, и наиболее простой и распространенный способ – наполнение полимерной матрицы армирующими включениями, причем эти включения могут менять цвет, теплофизические, электрофизические, триботехнические свойства и т.д. Можно отметить, что набор характеристик, описывающих свойства материала, может содержать до 50 позиций.

Часть из этих характеристик может быть получена экспериментально, часть – за счет разработки и реализации физико-математических моделей, имеющих предсказательную силу. В последнем случае появляется возможность проанализировать, какие из параметров

рецептуры и технологического процесса играют определяющую роль, и использовать эти параметры в качестве управляющих. Попутно можно отметить, что использование моделирования позволяет заметно сократить объемы и сроки экспериментальной отработки новых композиций.

Поскольку моделировать на современном этапе можно лишь часть эффективных свойств композиций, то другие – например, износ при трении, ударная вязкость, коэффициент трения – получаются преимущественно из прямых физических экспериментов. В работе для решения задач компьютерного конструирования, в которых требуется получить набор управляющих параметров, придающих заданные свойства композиции, привлекаются данные, полученные на основе как вычислительного, так и физического эксперимента. Такое сочетание позволяет, как показано ниже, решать задачи достаточно эффективно.

## **II. Постановка обратной задачи**

Наиболее наглядным предлагаемый подход к решению задач компьютерного конструирования становится в случае, когда число управляющих параметров равно двум. В этом случае можно использовать понятие пространства состояний, в котором по двум координатам откладываются значения управляющих параметров, по третьей – отвечающие им значения эффективных характеристик.

Для каждого конкретного сочетания двух управляющих параметров в пространстве состояний получается точка, характеризующая значение эффективной характеристики. По набору таких опорных точек с помощью полиномов Лагранжа строится уравнение поверхности отклика, и на регулярной сетке после этого можно построить поверхность, характеризующую зависимость эффективной характеристики от управляющих параметров. Заданные ограничения на эти характеристики порождают изолинии на плоскости управляющих параметров. Когда ограничения введены в интервале заданных значений, получается полоса на плоскости управляющих параметров. Если ограничения односторонние, то изолиния делит плоскость на две части, в одной из которых находятся нужные значения управляющих параметров.

Когда заданы ограничения на несколько эффективных характеристик материала одновременно, нужные сочетания управляющих параметров находятся путем наложения полученных графиков друг на друга, где они и будут отображаться в виде пересечения найденных областей. Если заданные эффективные характеристики не могут быть получены в данном диапазоне изменения управляющих параметров, это будет видно сразу. Построенные поверхности отклика сами по себе определяют диапазоны значений эффективных характеристик материала, которые реализуемы для данной композиции.

## **III. Результаты и обсуждение**

### **Конструирование композиции на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с медными включениями по свойствам, полученным в ходе численного моделирования**

По заданным значениям модуля упругости и предельной деформации необходимо найти степень наполнения, радиус включений и уровень адгезии, обеспечивающих эти значения эффективных характеристик дисперсно-наполненного полимерного материала.

Аналогично строятся зависимости модуля Юнга  $E$  и предельной деформации разрушения  $\epsilon$  от степени наполнения  $\phi$  и уровня адгезии  $kr$  при размере радиуса включений 20 мкм и 25 мкм.

Совмещая изолинии, получаем нужные области для уровня адгезии и степени наполнения композиции, обеспечивающих заданные ограничения указанных макрохарактеристик (рис. 1).

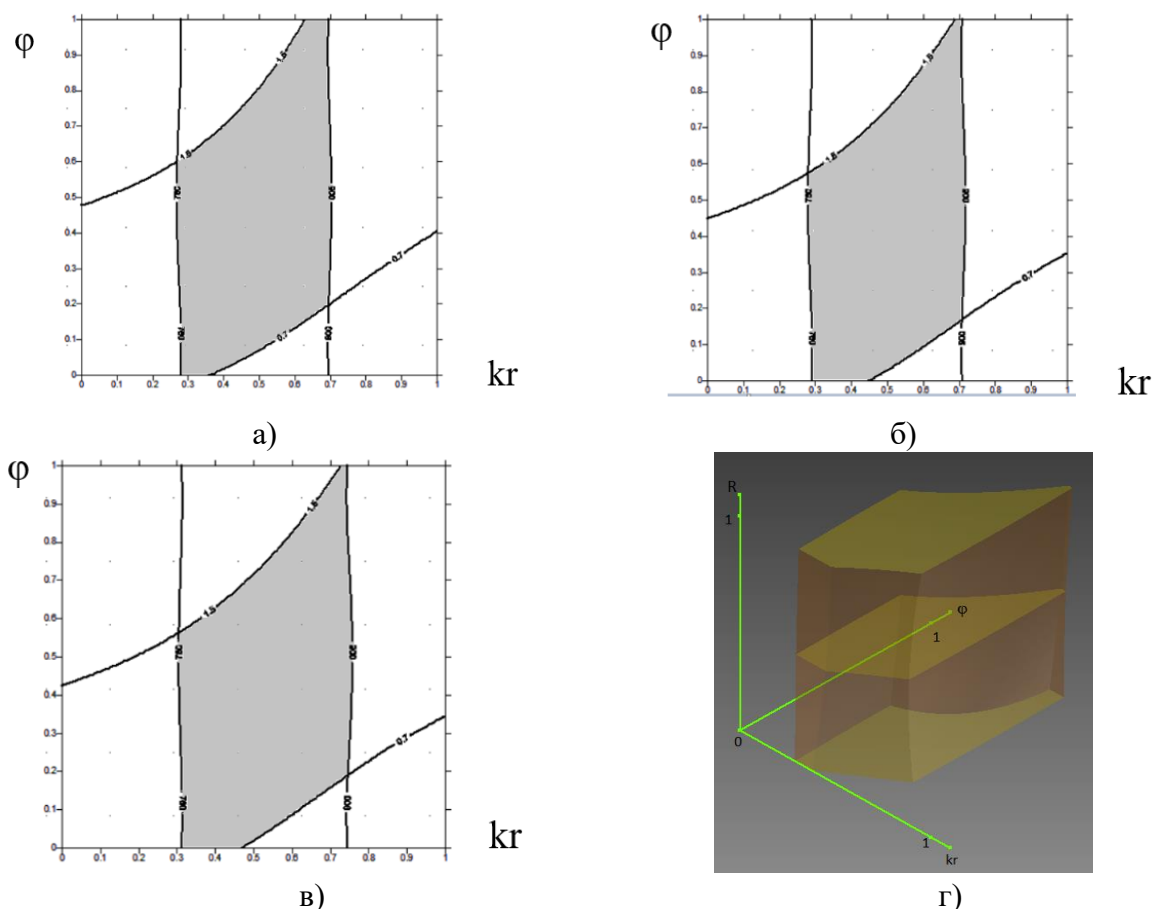


Рис. 1. Область значений управляющих параметров (степень наполнения и уровень адгезии) при радиусе включений 15 мкм (а), 20 мкм (б) и 25 мкм (в) их совмещение (г)

Таким образом, решением обратной задачи находятся значения уровня адгезии, радиуса включений и степени наполнения полимерной композиции при заданных ограничениях на модуль упругости и предельную деформацию разрушения при растяжении. Так, было получено, что модуль упругости растет с увеличением степени наполнения, падает с увеличением радиуса включений и не зависит от значения критерия отрыва включений, а предельная деформация при растяжении растет при уменьшении степени наполнения и увеличении значения критерия отрыва включений и радиуса включений.

### **Конструирование композиции на основе СВМПЭ, армированного дискретными стекловолокнами с добавлением аппрета, по свойствам, полученным экспериментальным путем**

В данном случае экспериментально полученные характеристики определяются средним размером порошка СВМПЭ и средней длиной стекловолокон, которые являются управляющими параметрами при прочих фиксированных значениях параметров (степени наполнения, диаметре стекловолокон, молекулярной массе СВМПЭ и др.).

Ниже представлен пример, когда односторонние ограничения заданы на такие эффективные характеристики, как ударная вязкость и модуль упругости композиции на основе СВМПЭ. На приведенных иллюстрациях значения управляющих параметров нормированы – нижней границе отвечает 0, верхней – 1.

Область управляющих параметров, отвечающая требуемым ограничениям для каждой эффективной характеристики, выделена цветом.



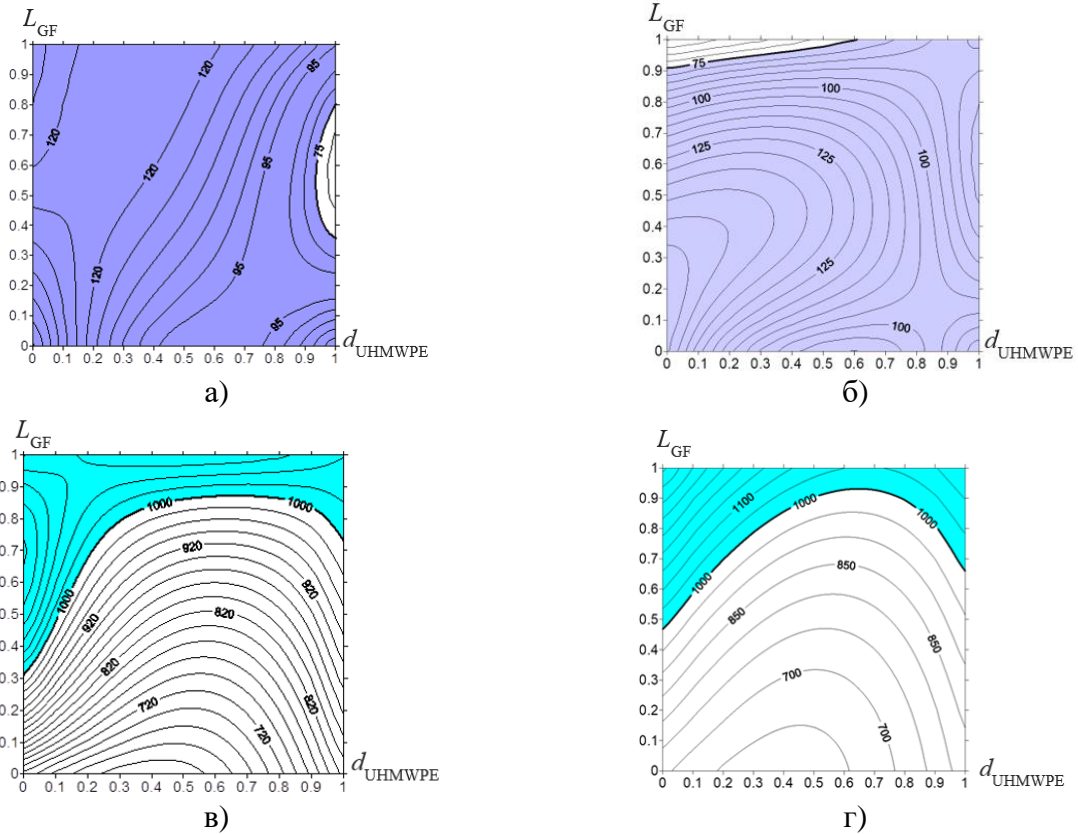


Рис. 2. Области изменения управляющих параметров, придающие заданные значения ударной вязкости  $ak$  (кДж/м) (а, б) и модулю упругости  $E$  (МПа) композита на основе СВМПЭ без аппрета (а, в) и с аппретом (б, г)

На рис. 3 показаны области управляющих параметров, которые обеспечивают получение заданных эффективных свойств, для двух случаев технологического процесса: (а) – без обработки армирующих волокон аппретом, (б) – с обработкой. Если теперь принять этот фактор – обработку, меняющую адгезию включений к матрице, – за третий управляющий параметр, то область нужных значений управляющих параметров становится трехмерной, и на рис. 4 показан ее вид.

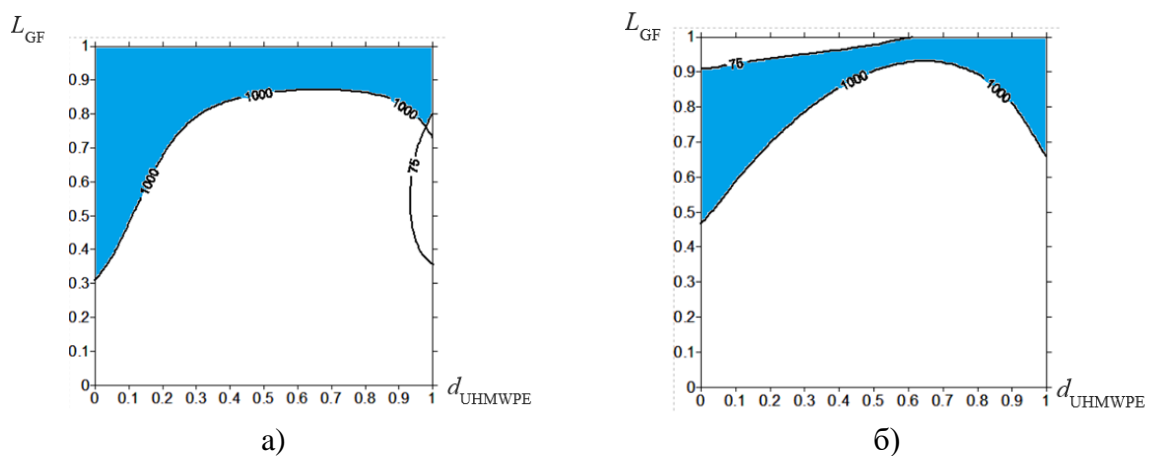


Рис. 3. Области, определяющие диаметр порошка СВМПЭ и длины стекловолокон, необходимых для получения композиции с заданными свойствами

Далее можно объединить полученные области путем введения уровня адгезии как третьего параметра. Для этого за нулевое значение адгезии следует взять композицию без аппрета, а за единицу – композит с аппретом (рис. 4).

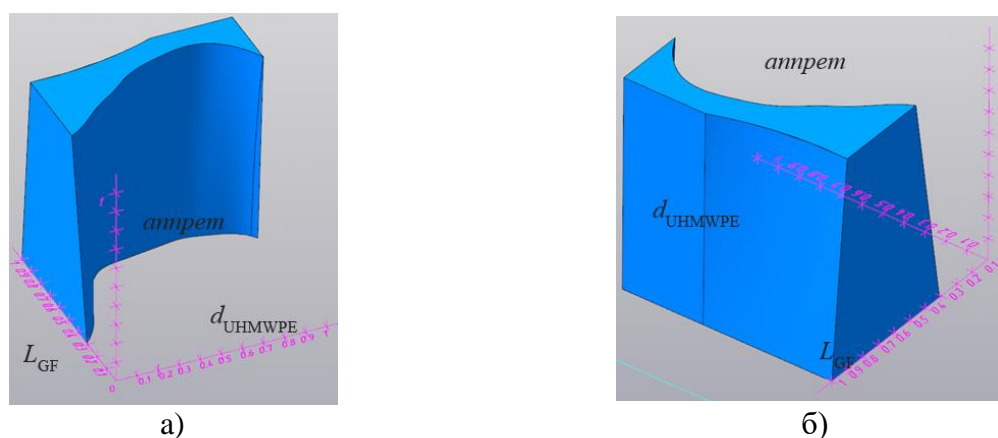


Рис. 4. Область допустимых значений трех параметров для получения композиции с требуемыми свойствами с двух ракурсов

## VI. Заключение

С использованием вычислительных экспериментов получены композиции с заданными эффективными характеристиками (модуль Юнга, предельная деформация разрушения) на основе СВМПЭ с дисперсными медными включениями. Рассмотрена композиция на основе СВМПЭ, армированного дискретными стекловолокнами, для которой получены ударная вязкость и модуль упругости, заданные на основе экспериментальных данных.

Описанный в работе подход к компьютерному конструированию композитов проиллюстрирован примерами, в которых теоретически и экспериментально исследованы несколько типов полимеров и различных наполнителей. Преимущества предлагаемого подхода – наглядность, использование ограниченного количества исходных данных вычислительного и/или натурального эксперимента. Кроме того, такой способ позволяет отсеять варианты, когда требования к характеристикам материала являются противоречивыми и невыполнимыми – в этом случае будут отсутствовать пересечения областей управляющих параметров для разных эффективных характеристик.

## Библиографический список

1. Bochkareva S. A., Grishaeva N. Yu., Lyukshin B. A. [et al.]. Obtaining of Specified Effective Mechanical, Thermal, and Electrical Characteristics of Composite Filled with Dispersive Materials // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Vol. 8, no. 5. P. 651–661. Doi: 10.1134/S2075113317050070.
2. Panin S. V., Grishaeva N. Yu., Lyukshin P. A. [et al.]. Receiving the Recipe of the Compositions Based on UHMWPE with the Assigned Properties // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10, no. 2. P. 299–304. Doi: 10.1134/S2075113319020321.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© И. Л. Панов, Н. Ю. Гришаева, Б. А. Люкшин, 2023

*Д. В. Постников, И. С. Кочнев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЯХ**

**Аннотация.** В работе методом рентгеноструктурного анализа проводился анализ быстрорежущей стали Р18, облученной сильноточным электронным пучком. С помощью этого метода получены дифрактограммы, по которым были определены основная фаза матрицы стали Р18 и положения интенсивностей и полуширины дифракционных максимумов (рефлексов). По полученным дифрактограммам определены межплоскостные расстояния, рассчитаны напряжения I рода (макронапряжения), которые позволяют оценить остаточные термонапряжения. Произведены расчеты размера областей когерентного рассеивания, величины среднеквадратичных смещений атомов из равновесного положения в решетке.

**Ключевые слова:** рентгеноструктурный анализ, дифрактометрия, термонапряжения.

### **I. Введение**

По сравнению с большинством «недифракционных методов» анализа остаточного напряжения, рентгеновский анализ напряжения (XSA) поликристаллических материалов требует очень много времени как в отношении измерения, так и оценки. Особенно это относится к материалам с ярко выраженной текстурой или большими градиентами остаточных напряжений в приповерхностной области, исследование которых является важной темой современных материаловедческих исследований. С другой стороны, управление производственным процессом часто требует исследования больших серий образцов. По этим причинам растет интерес к методам XSA, которые дают как можно больше информации о состоянии остаточного напряжения вблизи поверхности с минимальными затратами времени на измерения и оценку.

### **II. Постановка задачи**

Целью работы было изучить влияние сильноточного электронного облучения на структурно-фазовые превращения в стали Р18 и остаточные напряжения после облучения. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: провести рентгеноструктурный анализ быстрорежущей стали, облученной сильноточным импульсным электронным пучком; на основании рентгеноструктурного анализа произвести расчеты напряженного состояния кристаллической решетки, размера области когерентного рассеяния (ОКР), величины среднеквадратичных смещений атомов из равновесного положения в решетке по дифрактограммам.

### **III. Экспериментальная часть**

Дифрактограммы были исследованы на рентгеновском дифрактометре Shimadzu Maxima\_X XRD-7000, который находится в НОРЦН ОмГТУ.

Исследование топографии поверхности образца проводилось с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-5700. Тип сигнала – вторичные электроны (SEI). Параметры получения микрофотографий: ускоряющее напряжение 30 кВ, увеличение составляло 10000х. Облучение поверхности выполнялось пучком электронов с энергией  $E=400$  кэВ, время импульса  $\tau=0,2$  мкс, плотность тока  $j=1,2$  кА/см<sup>2</sup>. На рис. 1 представлены микрофотографии структуры поверхностного слоя стали Р18.

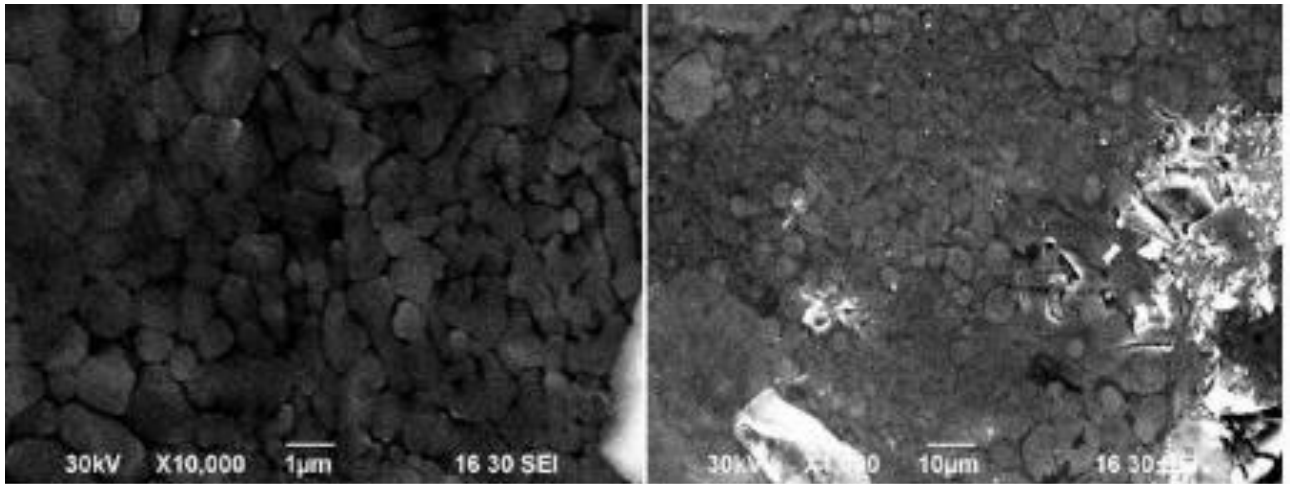


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали P18 после обработки электронным пучком

На основании микрофотографий был рассчитан средний размер кристаллитов  $d = 0,142$  мкм. Основной фазой матрицы стали P18 является  $\alpha$ -фаза (феррит), имеющая ОЦК кристаллическую решетку. Вторая фаза по объемной доле в составе стали P18 – это карбид  $(Fe,M)_6C$ , обладающий сложной ГЦК кристаллической решеткой [1].

Дифрактограммы быстрорежущей стали P18 до облучения (красная) и после облучения (синяя) представлены на рис. 2.

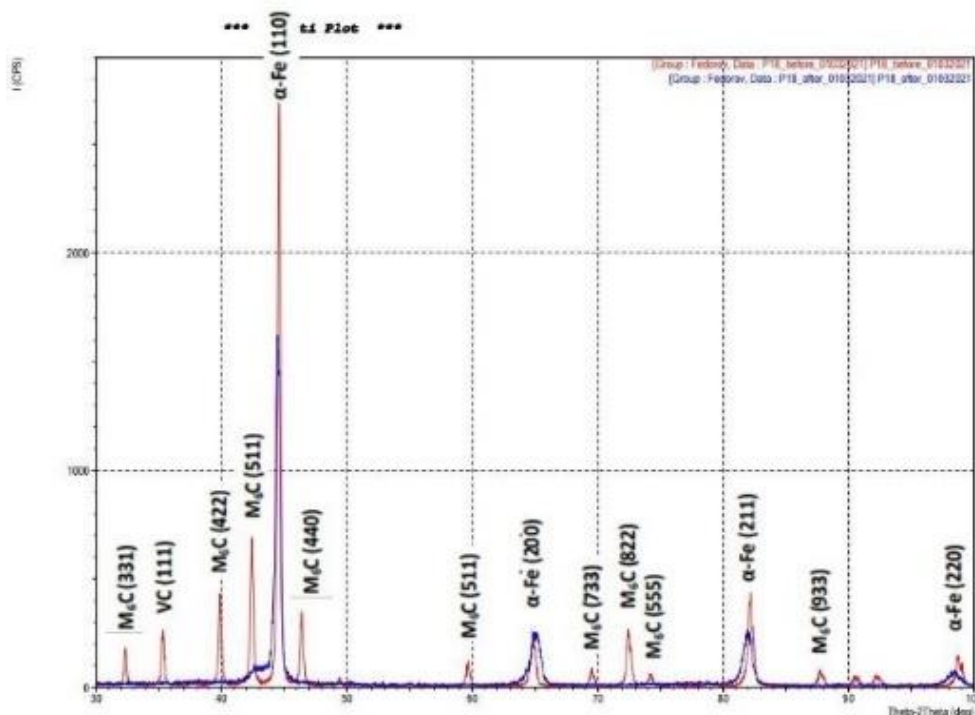


Рис. 2. Дифрактограммы быстрорежущей стали P18 до и после обработки

По полученным дифрактограммам определены по формуле Вульфа–Брэгга межплоскостные расстояния ( $d$ ) и рассчитаны по формуле (1) напряжения I рода.

$$(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{E\Delta d}{\mu d}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга),  $\sigma_1, \sigma_2$  – напряжения на поверхности образца.

Подставив известные величины в формулу (1), получили значения:  $(\sigma_1 + \sigma_2)_1 = -1,594$  МПа;  $(\sigma_1 + \sigma_2)_2 = -1,559$  МПа;  $(\sigma_1 + \sigma_2)_3 = 1,936$  МПа;  $(\sigma_1 + \sigma_2)_4 = -1,943$  МПа.

Из полученных значений можно сделать вывод о том, что присутствуют три растягивающих и одна сжимающая деформация [2].

Определение размеров ОКР:

$$D_{hkl} = \frac{n\lambda}{\beta \cos\theta'} \quad (2)$$

где  $n$  – часть истинного физического уширения линии, вызванная микронапряжениями и приблизительно равная 1,  $D$  – размер ОКР в ангстремах,  $\beta$  – физическое уширение линии на дифрактограмме в радианах (в шкале  $2\theta$ ),  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\theta$  – угол рассеяния.

Подставив известные величины в формулу (2), получили значения:  $D_{hkl1} = 0,036$  мкм,  $D_{hkl2} = 0,059$  мкм,  $D_{hkl3} = 0,18$  мкм,  $D_{hkl4} = 0,171$  мкм. Среднее значение ОКР  $\langle D \rangle = 0,114$  мкм.

Аппроксимация функций до и после облучения показана на рис. 3–4.

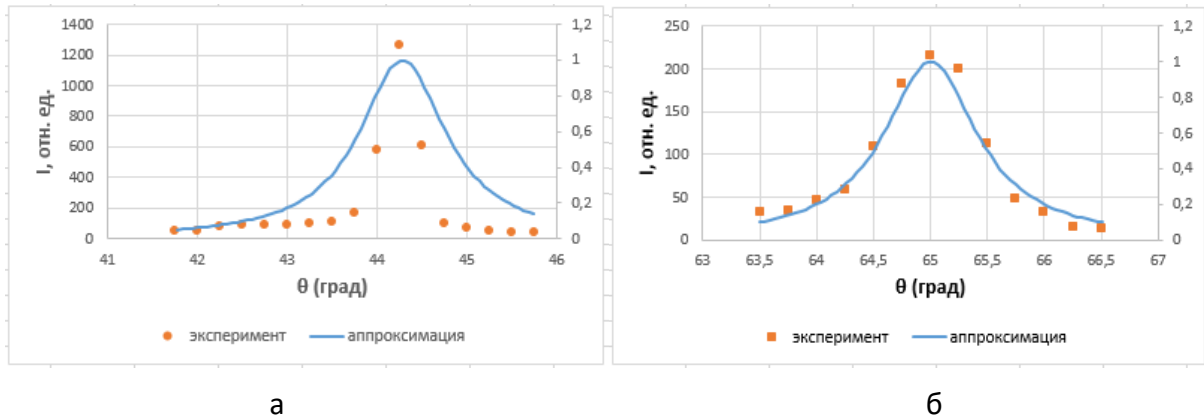


Рис. 3. Пик для угла  $44,5^\circ\theta$   $\alpha$ -Fe(110) – а, пик для угла  $65^\circ\theta$   $\alpha$ -Fe(200) – б

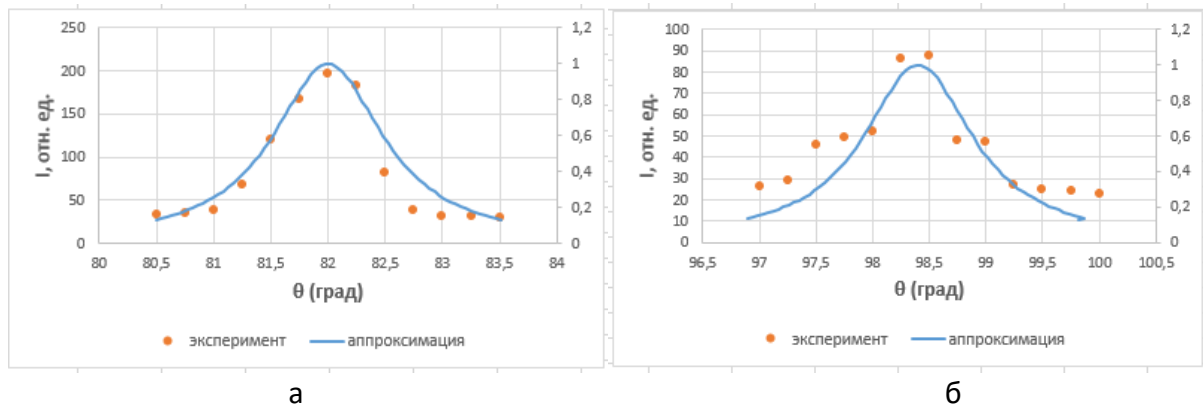


Рис. 4. Пик для угла  $82^\circ\theta$   $\alpha$ -Fe(211) – а, пик для угла  $98,5^\circ\theta$   $\alpha$ -Fe(220) – б

Рассчитана по формуле (3) величина среднеквадратичных смещений атомов из равновесного положения в решетке:

$$U_{ст}^2 = 3a^2 \ln \left[ \frac{\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{деф.}}{\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{недеф.}} \right] / 4\pi^2 [(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2) - (h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)] \quad (3)$$

где  $U_{cm}^2$  – среднее квадратичное смещение атомов при статических искажениях;  $h, k, l$  – индексы Миллера;  $I$  – интенсивность,  $\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{деф.}$  – соотношение соседних пиков дифрактограммы стали после облучения,  $\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{недеф.}$  – соотношение соседних пиков дифрактограммы стали до облучения;  $a$  – параметр кристаллической решетки,  $\pi$  – математическая постоянная.

Подставив известные величины в формулу (3), получили значения:  $U_{cm1}^2 = 0,001501$  нм,  $U_{cm2}^2 = 0,001896$  нм,  $U_{cm3}^2 = 0,000806$  нм,  $U_{cm4}^2 = 0,000137$  нм.

#### IV. Выводы и заключение

Проведенная аппроксимация функций до и после облучения показала, что присутствует физическое уширение линий, что говорит о несовершенстве определяемой структуры. Полученные статические искажения говорят о том, что произошло нарушение структуры образца и возникли различного рода дефекты в кристаллах. Было выявлено, что происходит: полное растворение исходной карбидной фазы; формирование ячеек дендритной кристаллизации; измельчение зеренной структуры стали вследствие протекания процесса динамической рекристаллизации, инициированного высоким уровнем напряжений, которые возникают в материале при высокоскоростном охлаждении.

1. На основании рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод о том, что в результате воздействия электронного пучка на сталь Р18 при энергии пучка  $E = 400$  кэВ,  $\tau = 0,2$  мкс,  $j = 1,2$  кА/см<sup>2</sup> происходит растворение вторичных карбидов.

2. В результате нагрева и последующего быстрого охлаждения возникает сложно деформированное состояние с максимальными внутренними напряжениями:  $(\sigma_1 + \sigma_2)_1 = -1,594$  МПа;  $(\sigma_1 + \sigma_2)_2 = -1,559$  МПа;  $(\sigma_1 + \sigma_2)_3 = 1,936$  МПа;  $(\sigma_1 + \sigma_2)_4 = -1,943$  МПа. Данные напряжения существенно ниже предела прочности.

3. На основании сравнительного анализа ОКР  $\langle D \rangle = 0,114$  мкм и размеров кристаллитов  $\langle d \rangle = 0,142$  мкм по микрофотографиям РЭМ стали Р18 после облучения можно сделать вывод о том, что средний размер зерен уменьшился на  $0,028$  мкм.

4. В результате среднеквадратичных смещений атомов из равновесного положения в решетке ( $U_{ст}^2 = 0,0011 \pm 0,0009$  нм) в кристаллах возникают различного рода дефекты, уменьшается интенсивность дифракционных пиков и возрастает диффузный фон.

#### Библиографический список

1. Сенько С. Ф., Зеленин В. А. Измерение локальных остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых структурах // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, №3. С. 254–262.

2. Monine V. I., Gonzaga R. S. [et al.]. X-Ray Diffraction Technique for Residual Stress Measurement in NiCrMo Alloy Weld Metal // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. P. 1–10. Doi:10.1155/2018/8986423.

*Дата поступления статьи: 26.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 16.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. В. Постников, И. С. Кочнев, 2023

*А. Е. Резванова<sup>1</sup>, А. Н. Пономарев<sup>1</sup>, Б. С. Кудряшов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ «ГИДРОКСИАПАТИТ–МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ»**

**Аннотация.** С помощью ультрамикротестера для динамических испытаний Shimadzu DUN-211 исследована твердость по Виккерсу биокерамики на основе гидроксиапатита (ГА) с добавками многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ). Содержание МУНТ в матрице ГА варьировалось от 0,05 до 0,5 масс.%. Установлено, что небольшое количество добавок МУНТ приводит к увеличению в 1,3 раза твердости и прочности на сжатие композита, что сравнимо по абсолютным значениям с литературными данными эмали по твердости (3–5 ГПа) и прочности на сжатие (95–370 МПа).

**Ключевые слова:** керамика, гидроксиапатит, многостенные углеродные нанотрубки, твердость, прочность, пористость.

### **I. Введение**

Для разработки имплантатов костной ткани используются различные биоматериалы, такие как диоксид титана, трикальцийфосфат, биоактивные стекла, силикат кальция, гидроксиапатит (ГА), поликапролактон, стеклоуглерод, диоксид циркония, композиты с углеродными нанотрубками и другие металлические и керамические материалы [1]. Хотя механические свойства материалов костных каркасов за последние десятилетия улучшились, их применение в ортопедии все еще ограничено [2]. Стеклоуглерод обладает хрупкостью и склонностью к разрушению при растяжении [3]. Титан — биоинертный металл с хорошей биостойкостью, биосовместимостью и долговечностью [4]. В то же время органические жидкости могут приводить к растворению титана и образованию ионов, способных реагировать с тканями организма и проявляться в виде токсической реакции [5]. Цирконий может разлагаться, подвергаться коррозии, а также иметь плохую вязкость разрушения, как и другие металлы [6]. Применение ГА в костных имплантатах ограничено из-за хрупкости и низкой трещиностойкости этого материала [2]. В то же время в последние десятилетия он привлекает большое внимание благодаря биосовместимости, остеокондуктивности, биоактивности и высокому химическому сходству с натуральной костью [2]. Улучшение механических свойств ГА может быть реализовано за счет использования армирующих фаз, в том числе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ). Замечательные свойства МУНТ, такие как гибкость, низкая плотность, высокая электро- и теплопроводность, высокие модуль Юнга, вязкость разрушения и способность эффективно передавать нагрузки по взаимосвязанной сети, позволяют использовать небольшие количества нанотрубок, чтобы улучшить механические свойства композитов и предотвратить или замедлить иницирование и распространение трещины в биокompозите [2].

### **II. Постановка задачи**

Целью настоящего исследования являются динамические измерения твердости по Виккерсу биокерамики на основе ГА с небольшим количеством (менее 0,5 масс.%) МУНТ. Акцентируется внимание на спекании композита, в котором повышение механических свойств достигается за счет использования малого количества добавок МУНТ для минимизации возможных токсических эффектов. ГА матрица необходима для получения



имплантата с высокой остеоинтеграцией и биологической активностью. Улучшение механических свойств ГА возможно путем варьирования количества добавок МУНТ и режимов процедуры спекания.

### III. Обсуждение результатов

Проведены измерения твердости по Виккерсу и прочности на сжатие керамических ГА образцов с добавками МУНТ. Пористость исследуемых образцов оценивалась методом Архимеда, прочность на сжатие была исследована с помощью испытательной машины типа Instron. Для образцов с концентрациями 0 масс.%, 0,2 масс.%, 0,3 масс.% и 0,5 масс.% МУНТ пористость составляла 27,5%, 18%, 14,5% и 8%, соответственно. Установлено, что с увеличением концентрации МУНТ пористость композитной керамики ГА-МУНТ снижается. На рис. 1 представлено влияние пористости на значения средней твердости по Виккерсу и средней прочности на сжатие керамики ГА-МУНТ.

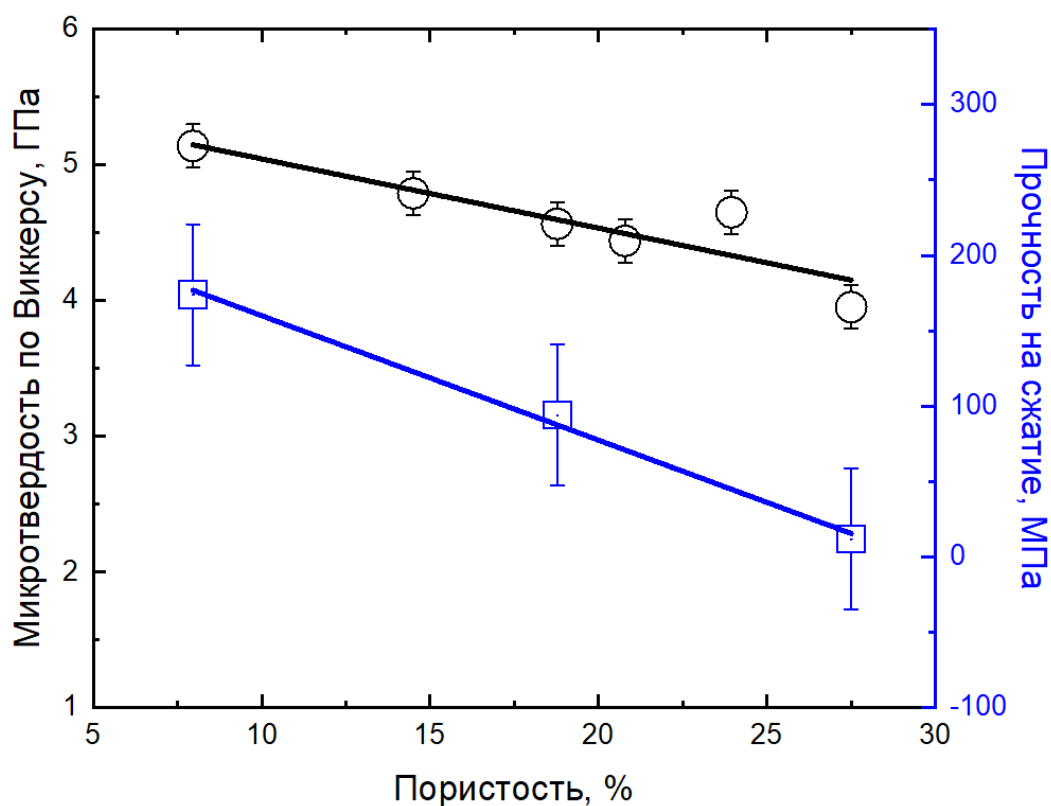


Рис. 1. Левая ось: зависимость средней твердости по Виккерсу от относительной пористости композита ГА–МУНТ в диапазоне концентраций МУНТ от 0 до 0,5 масс. %.

Правая ось: средняя прочность на сжатие [7] в зависимости от относительной пористости композита ГА–МУНТ

В результате исследований показано, что с увеличением концентраций МУНТ до 0,5 масс.% наблюдается линейный рост как твердости по Виккерсу, так и прочности на сжатие композитной керамики.

### IV. Заключение

Для керамических образцов ГА–МУНТ введение добавок МУНТ приводит к формированию более плотной керамики с меньшей пористостью и более высокими значениями твердости по Виккерсу и прочности на сжатие. Большая пористость в керамике ГА, по-видимому, связана с более высоким температурным градиентом в керамике по



сравнению с керамикой ГА–МУНТ [9]. Как для прочности на сжатие керамики [7], так и для твердости по Виккерсу наблюдается одинаковый наклон линейных кривых, приведённых на рис. 1, что свидетельствует об одинаковых тенденциях влияния добавок МУНТ на полученные значения пористости и механических свойств композитов на основе ГА. Твердость по Виккерсу полученной биокерамики ГА–МУНТ была сопоставима с литературными данными по твердости эмали, которая имеет значение 5,7 ГПа на верхней поверхности [10], а самое низкое значение твердости составляет 3 ГПа на эмалево-дентинном соединении [11]. Прочность на сжатие ГА с 0,2 и 0,5 масс.% МУНТ сравнима с прочностью на сжатие эмали (95–370 МПа) [12].

Научный руководитель: Пономарёв Александр Николаевич, к.ф.-м.н., заведующий ЛМИиФ ИФПМ СО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема №FWRW-2022-0002.

### Библиографический список

1. Abdollahi S., Paryab A., Khalilifard R. [et al]. The fabrication and characterization of bioactive Akermanite/Octacalcium phosphate glass-ceramic scaffolds produced via PDC method // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. P. 6653–6662. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.003>.
2. Khalid P., Suman V. B. Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composite for Bone Tissue Engineering and Their Interaction with Mouse Fibroblast L929 In Vitro // *Journal of Bionanoscience*. 2017. Vol. 11. P. 233–240. <https://doi.org/10.1166/jbns.2017.1431>.
3. Ananth H., Kundapur V., Mohammed H. S. [et al]. A review on biomaterials in dental implantology // *International journal of biomedical science*. 2015. Vol. 11. P. 113–120.
4. Boteanu R. M., Suica V. I., Ivan L. [et al]. Proteomics of regenerated tissue in response to a titanium implant with a bioactive surface in a rat tibial defect model // *Nature*. 2020. Vol. 10. P. 18493. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75527-2>.
5. Shen X., Zhang Y., Ma, P. [et al.]. Fabrication of magnesium/zinc-metal organic framework on titanium implants to inhibit bacterial infection and promote bone regeneration // *Biomaterials*. 2019. Vol. 212. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.05.008>.
6. Patil N. A., Kandasubramanian B. Biological and mechanical enhancement of zirconium dioxide for medical applications // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. P. 4041–4057. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.220>.
7. Barabashko M. S., Tkachenko M. V., Neiman A. A. [et al.]. Variation of Vickers microhardness and compression strength of the bioceramics based on hydroxyapatite by adding the multi-walled carbon nanotubes // *Applied Nanoscience*. 2020. Vol. 10. P. 2601–2608. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01019-z>.
8. Rao W. R., Boehm, R. F. A Study of Sintered Apatites // *Journal of Dental Research*. 1974. Vol. 53. P. 1351–1354. <https://doi.org/10.1177/00220345740530061001>.
9. Barabashko M. S., Tkachenko M. V., Rezvanova A. E. [et al.]. Analysis of temperature gradients in the hydroxyapatite ceramics with the additives of multi-walled carbon nanotubes // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2021. Vol. 95. P. 1017–1022. <https://doi.org/10.1134/S0036024421050058>.
10. *Handbook of Nanoindentation: With Biological Applications* / edited by M. L. Oyen. Cambridge: Pan Stanford Publishing, 2010. 358 p.
11. Imbeni V., Kruzic J. J., Marshall G. W [et al.]. The dentin–enamel junction and the fracture of human teeth // *Nature Materials*. 2005. Vol. 4. P. 229–232. <https://doi.org/10.1038/nmat1323>.

12. Suchanek W., Yoshimura M. Processing and properties of hydroxyapatite-based biomaterials for use as hard tissue replacement implants // Journal of Materials Research 1998. Vol. 13. P. 94–117. <https://doi.org/10.1557/JMR.1998.0015>.

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 10.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А.Е. Резванова, А.Н. Пономарев, Б.С. Кудряшов, 2023

УДК 620.186

Е. А. Рогачев<sup>1</sup>, О. В. Малий<sup>1</sup>, Д. Н. Маркова<sup>1</sup>, Н. А. Погорелова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СУШКИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ЕЕ МОРФО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Аннотация.** Представлен результат исследования методом ИК-спектromетрии бактериальной целлюлозы, полученной различными методами сушки. Показано, что применение различных методов сушки приводит к получению материалов с различными физическими свойствами, а также что ИК-спектры этих образцов имеют различия в диапазоне частот  $1600\text{--}2360\text{ см}^{-1}$ , что может быть связано с формированием дополнительных связей в процессе сушки.

**Ключевые слова:** ИК-спектроскопия, бактериальная целлюлоза, лиофильная сушка, влагопитывание.

### 1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется биополимерам, самым распространенным из них является целлюлоза. Чаще всего, источником целлюлозы выступают клеточные стенки растений. Однако еще в 1886 году А. Браун показал, что некоторые аэробные бактерии формируют вокруг себя защитную пленку, по химическому составу идентичную растительной целлюлозе [1]. Бактериальная целлюлоза (БЦ) обладает рядом особых физико-химических и механических свойств, что делает ее привлекательной в качестве нового материала в различных областях, а ее биоразлагаемость и биосовместимость обуславливают перспективность ее применения в медицине и пищевой промышленности [2].

БЦ имеет волокнистую структуру, иерархия ее организации начинается с уровня элементарных фибрилл, которые объединяются в микрофибриллы, далее в макрофибриллы [3]. Фибриллы толщиной около 1,5 нм представляют собой 10–15 глюконовых цепей, имеющих длину 1–9 мкм, которые формируются путем полимеризации липопротеиновым слоем цитоплазматической мембраны клеток бактерий [4]. Сформировавшиеся фибриллы объединяются в микрофибриллы, которые объединяются в пучки толщиной 50–80 нм [5, 6]. В зависимости от конформации молекул БЦ ее морфология и функциональные свойства, такие как влагопитывание, могут существенно отличаться. Понимание механизма формирования пространственной конфигурации молекулярных цепей БЦ позволяет проводить ее направленную модификацию с целью придания ей требуемых свойств.

## **II. Постановка задачи**

С целью обеспечения возможности направленного модифицирования свойств бактериальной целлюлозы были изучены изменения структуры химических соединений и свойств образцов БЦ, полученные двумя методами сушки – температурной (на воздухе) и лиофильной. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи. Провести подготовку образцов БЦ, выращенных в одной питательной среде с использованием двух методов сушки. Исследовать их влаговпитывающую способность, исследовать молекулярную структуру методом ИК-спектроскопии. Установить и объяснить полученные закономерности.

## **III. Теория**

БЦ характеризуется высокой чистотой, прочностью, эластичностью, высокой биосовместимостью, сорбционной способностью. Эти свойства позволяют использовать ее при создании композитных материалов [4], создании водных дисперсий с особыми реологическими свойствами [5], использовать в медицине как матрицу-носитель лекарственных препаратов для приема внутрь или в виде покрытия на раны и ожоги [6, 7], в пищевой промышленности в качестве загущающей, желеобразующей, стабилизирующей и эмульгирующей пищевой добавки [8].

Различные методы сушки оказывают влияние на характеристики БЦ, которые определяют ее применение для разных целей [2], различия заключаются в степени сохранения трехмерной структуры и влияния на физические свойства БЦ.

Сушка при комнатной температуре – самый простой метод, однако при ней наблюдается потеря исходной пористой микроструктуры влажного исходного гидрогеля БЦ [9]. БЦ, высушенная в печи, имеет более компактную структуру с более высокой кристалличностью, пределом прочности на разрыв и модулем Юнга [10].

Сублимационная или лиофильная сушка – способ мягкой сушки веществ, при котором материал предварительно замораживается, а затем вакуумируется, что позволяет воде переходить из твердого состояния напрямую в газообразное, для интенсификации процесса сушки производится подвод тепловой энергии.

Для выявления особенностей конформации молекул бактериальной целлюлозы путем выявления сформированных связей используется метод инфракрасной (ИК) спектроскопии.

В основе работы данного метода лежит взаимодействие дипольных молекул образца с падающим ИК-излучением. В результате такого взаимодействия в регистрируемом ИК-спектре формируются зоны поглощения, характерные для определенных типов связей атомов. Анализ ИК-спектров позволяет установить наличие тех или иных связей в молекулярной структуре вещества и, как следствие, провести его идентификацию.

Влаговпитывающая способность оценивалась путем измерения массы образцов до сушки, после сушки, а также после выдержки сухих образцов в воде в течение 15 минут.

## **IV. Результаты экспериментов и их обсуждение**

В качестве объектов исследования были взяты образцы БЦ, биосинтез которых осуществляли при статическом культивировании симбиотической культуры *Medusomyces gisevii* в культуральной среде сахароза [11]. Сформированные на поверхности воды пленки целлюлозы после извлечения промывались деионизированной водой до полного удаления примесей. Для устранения клеточных остатков в матрице БЦ ее промывали 0,1 М NaOH в течение 60 минут при температуре 30 °С.

Полученные образцы были высушены двумя различными методами: методом температурной сушки (на воздухе) (рис. 1а), методом лиофильной сушки (рис. 1б).

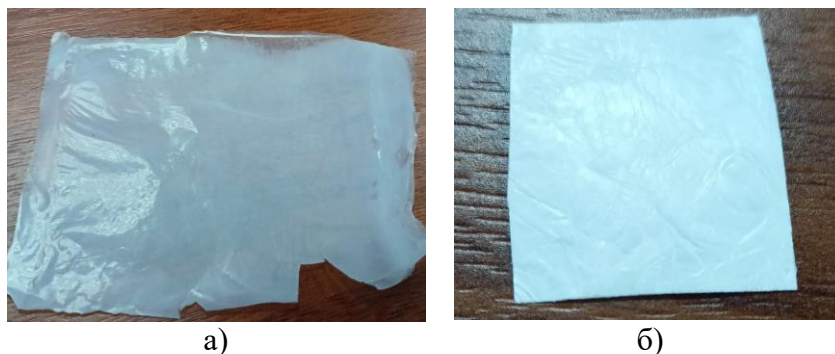


Рис. 1. Внешний вид образцов БЦ: а) температурная сушка, б) лиофильная сушка

Полученные образцы отличаются по внешнему виду. При лиофильной сушке образец плотный молочного цвета с глянцевой поверхностью. После температурной сушки – образец тонкий, частично прозрачный.

По изменению массы гель-пленки после высушивания установлено, что в ней доля сухого вещества составляет 1,5%. Для оценки влагопитывающей способности по 3 образца БЦ, высушенных при помощи температурной и лиофильной сушки, погружали в раствор хлорида натрия 0,9 % и помещали в термостат на 2 часа при температуре  $37 \pm 2^\circ\text{C}$ . Повторным взвешиванием набухших образцов установлено, что доля сухого вещества в образцах, высушенных методом лиофильной сушки, не превышала ( $13,0 \pm 0,9$ ) %, в то время как у образцов, высушенных методом температурной сушки, доля сухого вещества достигала ( $34,2 \pm 3,4$ ) %.

С целью выявления межмолекулярных связей, сформированных в процессе сушки, были получены ИК-спектры образцов БЦ. Исследование проводилось на ИК-Фурье спектрометре ФТ-802 (Симекс, Россия) (рис. 2).

ИК-спектр целлюлозы определяется в основном поглощением трех гидроксильных групп, находящихся в составе каждого глюкопиранозного звена. Из-за образования водородных связей кислородными атомами глюкозидных звеньев и кислородными мостиками существует ряд стабильных кристаллических надмолекулярных структур, которые связаны между собой неупорядоченными областями полимера.

Такое многообразие конфигураций молекулы целлюлозы проявляется в изменении морфологии образцов, связанной с различием связей субфибрилл, и это проявляется в виде сильного уширения полос поглощения в ИК-спектрах.

Интенсивная полоса  $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$  обусловлена валентными колебаниями ОН-групп. Менее интенсивная в области  $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$  обусловлена валентными колебаниями групп  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$ . В спектре целлюлозы интенсивная полоса с максимумом при  $1641\text{ см}^{-1}$  принадлежит деформационным колебаниям ОН-групп прочно связанной воды. Полоса при  $1281\text{ см}^{-1}$  указывает на валентные колебания ОН-групп в спиртах. Полосы поглощения в области  $1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$  обусловлены в основном валентными колебаниями  $\text{C-O-C}$  и  $\text{C-O}$  в спиртах. Полоса при  $899\text{ см}^{-1}$  подтверждает наличие  $\beta$ -1,4 связей. ИК-спектры показывают, что БЦ не содержит примесей, в частности лигнина, присутствующего в растительной целлюлозе, так как отсутствуют полосы поглощения, характерные для ароматических соединений (лигнина) [12].

В области частот  $3000\text{--}1600\text{ см}^{-1}$  наблюдаются различия в спектрах поглощения образцов (рис. 2б), полученных различными методами сушки, в частности для образцов, высушенных методом температурной сушки, наблюдаются интенсивные линии поглощения, отсутствующие у образцов, подготовленных методом лиофильной сушки.

Валентные колебания  $\text{C-H}$ -связей в метиленовых и метиновых группах целлюлозы проявляются в области  $2356\text{--}2159\text{ см}^{-1}$ . Полосы  $2159\text{--}2015\text{ см}^{-1}$  характеризуют, соответственно, асимметричные и симметричные валентные колебания метиленовых групп

( $-\text{CH}_2-$ ). Область частот  $2015\text{ см}^{-1}$  и  $1970\text{ см}^{-1}$  в ИК спектрах углеводов чувствительна к изменению конформаций оксиметильной группы ( $-\text{OH}-\text{CH}_2-$ ). Описанные линии поглощения наблюдаются для образцов, полученных методом температурной сушки.

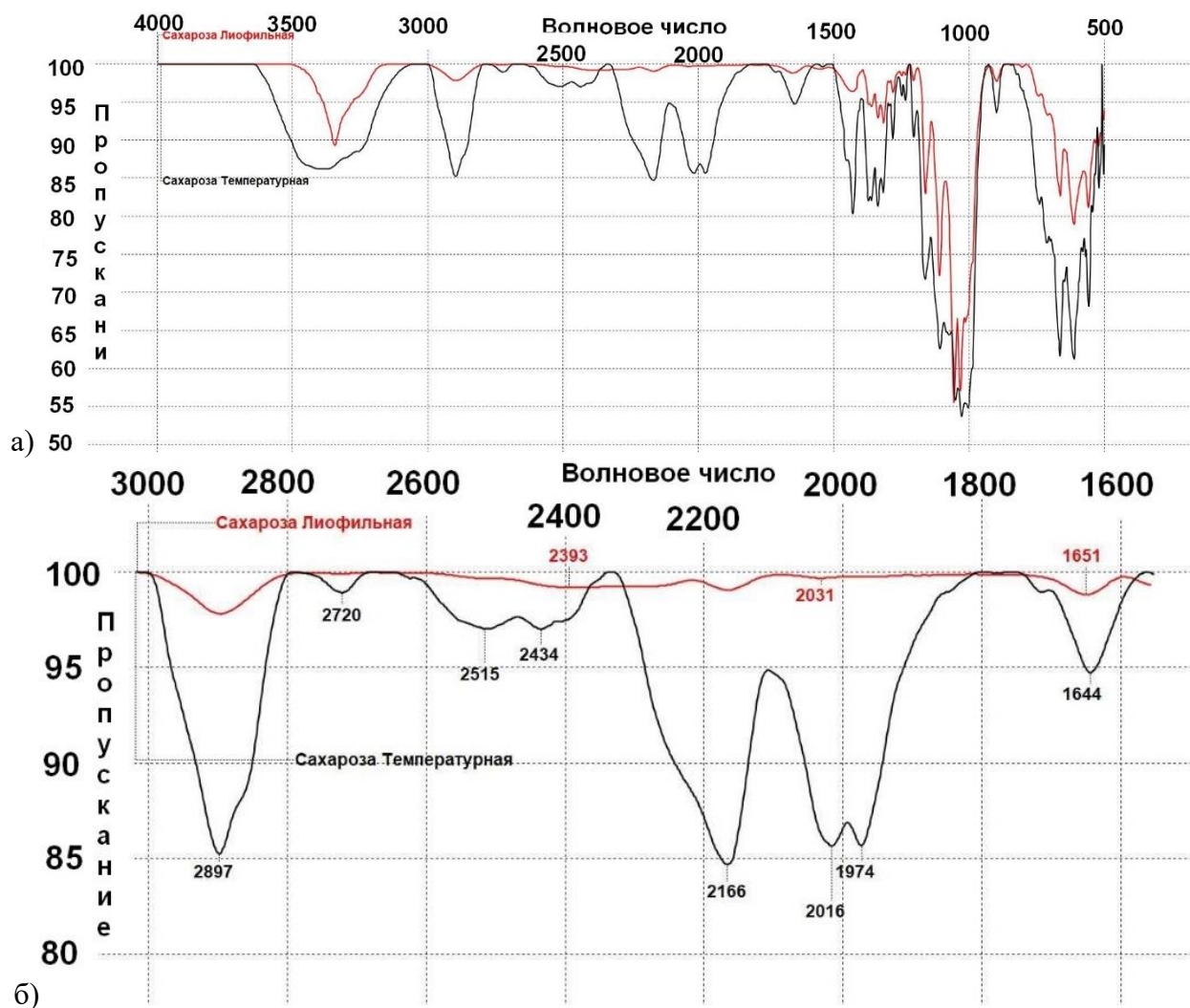


Рис. 2. ИК-спектр образцов БЦ. Красная линия соответствует образцу после лиофильной сушки, черная – образцу после температурной сушки: а) полный спектр, б) фрагмент различающейся части спектра

Из литературных источников [13] известно, что вода в целлюлозе может находиться в двух видах – свободном и связанном. Свободная влага заполняет поры и удерживается капиллярными силами. Связанная же вода удерживается водородными связями, образованными с гидроксильными группами целлюлозных цепей. Количество свободных молекулярных групп может меняться в зависимости от метода сушки.

## VI. Выводы и заключение

Разнообразие элементов надмолекулярной структуры БЦ, вызванное наличием свободной и связанной влаги, проявляется в изменениях ИК-спектров образцов, подготовленных с применением различных методов сушки. И это же существенно влияет на ее физические свойства. В частности, установлено, что влаговпитывающая способность образца, полученного методом лиофильной сушки, существенно выше образца, полученного методом температурной сушки, что, вероятно, связано с формированием дополнительных межмолекулярных связей в процессе температурной сушки, препятствующих закреплению

молекул воды. Наличие дополнительных связей подтверждается полосами поглощения в диапазоне 1800–2600 см<sup>-1</sup>, отсутствующих в спектре образца, полученного методом лиофильной сушки.

На основании исследований можно предложить, что БЦ, высушенную методом температурной сушки, целесообразно использовать в качестве пищевой упаковки, а БЦ, высушенную методом лиофильной сушки, оптимально применять в пищевой промышленности в качестве загустителя или пищевого волокна.

### Библиографический список

1. Brown A. J. On an acetic ferment which forms cellulose // Journal of the Chemical Society, Transactions. 1886. V. 49. P. 432.
2. Скворцова З. Н., Громовых Т. И., Грачев В. С. [и др.]. Физико-химическая механика бактериальной целлюлозы // Коллоидный журнал. 2019. Т. 81, № 4. С. 441–452.
3. Алешина Л. А., Глазкова С. В., Луговская Л. А. [и др.]. Современные представления о строении целлюлоз (обзор) // Химия растит. Сырья. 2001. № 1. С. 5–36.
4. Болотова К. С., Чухчин Д. Г., Майер Л. В. [и др.]. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы // Лесной журнал. 2016. № 6. С. 153–165.
5. Pokalwar S. U., Mishra M. K., Manwar A. V. Production of cellulose by Gluconacetobacterias // Recent research in science and technology. 2010. №. 2(7). P. 14–19. Doi:10.3389/fmicb.2017.02027.
6. Лубянский В. Г., Гладышева Е. К., Скиба Е. А. [и др.]. Протезирующая герниопластика с использованием бактериальной наноцеллюлозы: экспериментальное исследование // Клиническая и экспериментальная хирургия. Журнал имени академика Б.В. Петровского. 2018. Т. 6, № 2. С. 59–66.
7. Wu R-Q., Li Z-X., Yang J-P. [et al.]. Mutagenesis induced by high hydrostatic pressure treatment: a useful method to improve the bacterial cellulose yield of a Gluconoacetobacterxylinus strain // Cellulose. 2010. V. 17 (2). P. 399–405. Doi 10.1007/s10570-009-9388-8.
8. Павлов И. Н., Кузнецов П. С, Шилов А. И. Исследование процесса сублимационной сушки бактериальной наноцеллюлозы // Ползуновский вестник. 2020. № 4. С. 88–94.
9. Feng X., Ullah N., Wang X. Characterization of bacterial cellulose by Gluconacetobacterhansenii CGMCC 3917 // Journal of Food Science. 2015. V. 80. P. 2217–2227. Doi: 10.4172/2155-9821.1000160
10. Белкина С. Е. Погорелова Н. А. Структурные характеристики целлюлозы синтезированной симбиотической культурой Medusomyces Gisevii // Студенческая наука об актуальных проблемах и перспективах инновационного развития регионального АПК: материалы XVII науч.- практ. конф. обучающихся, 29 марта 2018 г. Тара, 2018. С. 92–95.
11. Белкина С. Е., Погорелова Н. А. Исследование структуры бактериальной целлюлозы // Сборник материалов XXIV науч.-техн. студенческой конф., 11 апреля 2018 г. Омск, 2018. С. 187–192.
12. Люханова И. В. Исследование структуры технической целлюлозы методами рентгеновской дифрактометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2019. 156 с.

*Дата поступления статьи: 03.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 05.06.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. А. Рогачев, О. В. Малий, Д. Н. Маркова, Н. А. Погорелова, 2023

*А. П. Сазанков, С. В. Шилько, Т. В. Дробыш*

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

## **ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ КАК ПРИЧИНА РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

**Аннотация.** В лабораторных условиях исследованы причины потери герметичности трубопроводов, состоящих из стальных труб с внутренним антикоррозионным полимерным покрытием, соединенных муфтами из нержавеющей стали с использованием двухкомпонентного полимерного герметика. Подготовлены и испытаны на адгезионную прочность модельные образцы соединений «защитная втулка из нержавеющей стали – герметик – антикоррозионное покрытие трубы» с различной толщиной слоя герметика. Выполненный анализ адгезионной прочности позволяет дать рекомендации по монтажу соединений, исключающие возможность разгерметизации трубопроводов.

**Ключевые слова:** металлополимерные трубы, герметики, трещинообразование, адгезионная прочность, механические испытания.

### **I. Введение**

В настоящее время для предотвращения коррозии внутренней поверхности стальных труб для нефтяной промышленности применяют защитные полимерные покрытия. Они обладают высокой прочностью, адгезией к стали, сопротивлением абразивному изнашиванию и стойкостью к химически активным нефтесодержащим жидкостям.

При монтаже указанные металлополимерные трубы соединяют между собой при помощи тонкостенных втулок из нержавеющей стали, клеиваемых в торцевые части труб быстротвердеющим полимерным герметиком. Работоспособность такого соединения во многом определяется прочностью герметика и его эластичностью, обеспечивающей сохранение сплошности клеевого слоя при возможном перекосе соединяемых труб. В процессе эксплуатации трубопроводов наблюдается потеря герметичности указанных соединений, что проявляется в виде утечек буровых растворов и других жидкостей.

Цель работы – выявление причины разгерметизации нефтепромысловых трубопроводов.

Объектом исследования является адгезионное соединение «стальная втулка – герметик – полимерное покрытие трубы».

Методики исследования – статические механические испытания по определению адгезионной прочности при отрыве модельных образцов соединения «втулка – герметик – покрытие трубы» с различной толщиной клеевого слоя, а также измерение твердости полимеризованного герметика.

### **II. Используемые материалы и подготовка образцов**

В качестве показателя адгезии при склеивании жестких материалов обычно принимается прочность при нормальном отрыве (трансверсальная прочность) [1]. Для контроля этого показателя в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 32299 (ISO 4624) [2] следует изготовить и испытать стандартные образцы такого соединения в виде склейки, имитирующей данную комбинацию материалов.

Адгезионная прочность герметика при отрыве определялась на машине для механических испытаний Инстро 5567 [3] по вышеуказанному стандарту [1]. После



разрезания трубы  $\varnothing 159 \times 6$  мм с внутренним антикоррозионным покрытием П-Эп-585 в осевом направлении полученный фрагмент устанавливался на машине Инстрон 5567 и фиксировался зажимами, как показано на рис. 1а. Из втулки  $\varnothing 159 \times 6$  мм (сталь 12Х18Н10Т) были вырезаны квадратные пластинки размером  $9 \times 9$  мм. Они припаивались свинцово-оловянным припоем к торцевой поверхности стальных штифтов («грибков»). Приготовление двухкомпонентного герметика Г-039 3 производилось смешиванием 2 вес. частей смолы и 1 вес. части отвердителя. Склеиваемые поверхности обезжиривались этанолом и ацетоном.

После смазывания герметиком Г-039 3 штифты позиционировались на подготовленных участках поверхности полимерного покрытия П-Эп-585 трубы с обеспечением плотного контакта соединяемых элементов для получения минимальной толщины клеевого слоя, как это рекомендуется руководствами, например, [1]. Производилось холодное отверждение герметика в течение 18–20 часов при средней температуре  $18^{\circ}\text{C}$ .

### III. Определение адгезионной прочности полимерного герметика на отрыв

При проведении испытаний по определению адгезионной прочности хвостовики штифтов соединялись гибкой связью (металлическим тросиком) с верхним захватом испытательной машины, как показано на рис. 1. После тщательной центровки, исключающей перекося штифтов относительно силовой оси машины и действие изгибающего момента в зоне склеивания, производилось статическое нагружение образцов адгезионных соединений «нержавеющая сталь – антикоррозионное полимерное покрытие» со скоростью  $V = 10$  мм/мин.



Рис. 1. Закрепление фрагмента трубы на нижнем захвате машины (а) и приложение нагрузки к приклеенному штифту через гибкую связь (б)

Для получения регламентированной стандартом [2] статистически значимой выборки (не менее 10 испытаний) было проведено 12 испытаний образцов с получением диаграмм деформирования (рис. 2), по которым определяли значения максимального напряжения, характеризующего прочность герметика Г-039 3 в адгезионном соединении «стальная втулка – герметик – полимерное покрытие трубы».



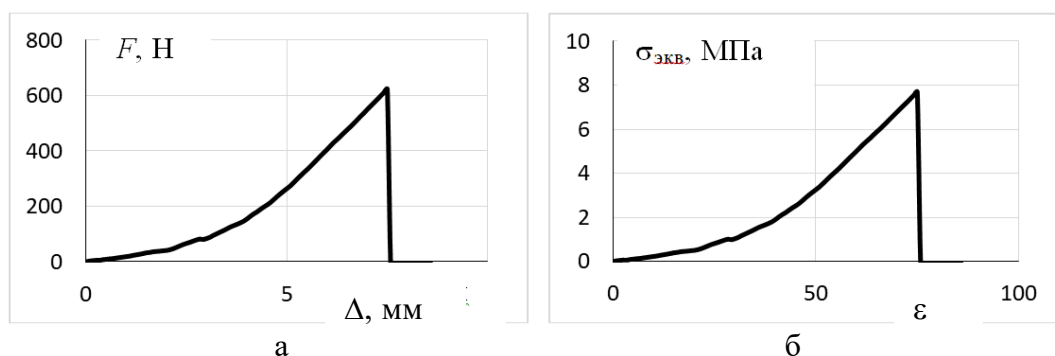


Рис. 2. Зависимости «усилие – перемещение» (а) и «напряжение – деформация» (б) для образца адгезионного соединения с минимальной толщиной клеевого слоя

Визуальный контроль поверхности отрыва для всех образцов показал тип разрушения по ГОСТ 32299 (ISO 4624) [1, с. 8]: «когезионное разрушение слоя клея». Из полученных результатов испытаний были выбраны 9 значений максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$ , представленные в таблице 1.

Таблица 1

**Напряжения при отрыве  $\sigma_{\max}$  при минимальной толщине клеевого слоя**

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
$\sigma_{\max}$ , МПа	8,49	11,96	7,52	8,80	7,25	7,24	7,70	6,87	8,11	8,22

Видно, что в ряде случаев адгезионная прочность при отрыве  $\sigma_a = \sigma_{\max} = \sim 7$  МПа, что немного меньше нормативного показателя  $[\sigma_a] = 8$  МПа. Вместе с тем, среднее значение по всей выборке составило 8,22 МПа благодаря тому, что отдельные испытания показали довольно высокие значения максимального напряжения, вплоть до 12 МПа (образец № 2). Вышесказанное является основанием считать адгезионную прочность герметика Г-039 3 при отрыве удовлетворительной.

Для выяснения причин разгерметизации были проведены дополнительные испытания по определению адгезионной прочности соединения при различной толщине клеевого слоя (2, 4, 6 и 8 мм), что мотивировалось возможностью неравномерного распределения герметика по площади контакта при монтаже трубопроводов в реальных условиях. В таблице 2 полученные результаты представлены в обобщенном виде.

Таблица 2

**Напряжения при отрыве  $\sigma_{\max}$  при различной толщине клеевого слоя**

Толщина слоя	$\sigma_{\max}$ , МПа							Вид разрушения
	1	2	3	4	5	6	Среднее	
2 мм	5,19	6,61	4,60	–	–	–	5,47	когезионное
4 мм	4,79	5,51	6,05	4,97	4,38	6,17	5,31	когезионное
6 мм	6,66	6,25	5,18	–	–	–	6,03	смешанное
8 мм	2,24	2,02	2,45	3,28	–	–	2,50	адгезионное

Видно, что увеличение толщины клеевого слоя вызывает изменение характера разрушения и значительное снижение адгезионной прочности. В частности, на рис. 3 приведены диаграммы деформирования образца адгезионного соединения при толщине

клеяного слоя 6 мм, а на рис. 4 показан характер разрушения этого соединения, который может быть когезионным и смешанным (когезионно-адгезионным).

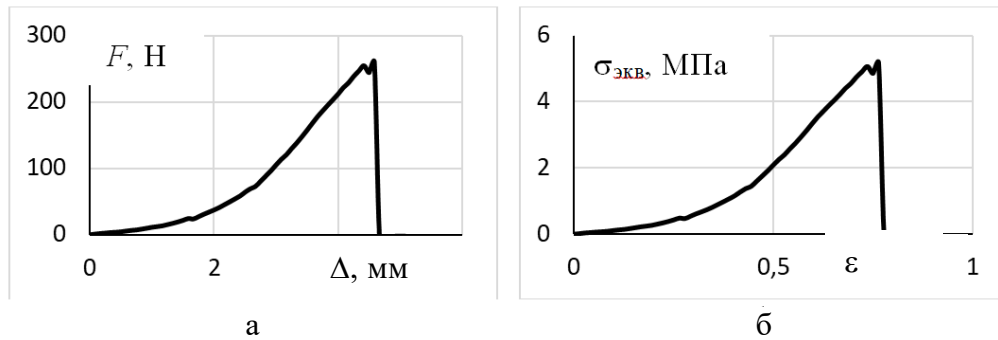


Рис. 3. Зависимости «усилие – перемещение» (а) и «напряжение – деформация» (б) для образца адгезионного соединения при толщине клеяного слоя 6 мм



Рис. 4. Когезионное и смешанное разрушение соединения при толщине клеяного слоя 6 мм

С помощью прибора ТВР-DM (рис. 5) также была определена твердость отвержденного герметика по Шору D. Результаты измерения в 5-ти точках и среднее значение твердости приведены в таблице 3.



Рис. 5. Твердомер по Шору модификации ТВР-DM

**Результаты измерения твердости отвержденного герметика**

Твердость по Шору D					Среднее
62	63	66	68	67	65,2

Можно заметить, что полученные значения максимального напряжения отрыва  $\sigma_{\max} \sim 5 \div 6$  МПа существенно меньше нормативного показателя 8 МПа и ранее достигнутой прочности при отрыве при минимальной толщине клеевого слоя. Так, при толщине клеевого слоя 2 мм среднее значение напряжения отрыва = 5,47 МПа, при толщине 4 мм – 5,31 МПа, при толщине 6 мм – 6,03 МПа и при толщине 8 мм – 2,50 МПа соответственно.

Более того, с увеличением толщины клеевого слоя меняется механизм разрушения: при 4 мм наблюдается когезионное разрушение, при 6 мм – смешанный вид разрушения (когезионное и адгезионное), а при 8 мм имеет место адгезионное разрушение всех образцов. Поскольку из-за перекоса трубопровода иногда образуется значительный монтажный зазор (радиальное смещение втулки относительно внутренней поверхности металлополимерной трубы), толщина клеевого слоя может превысить 6 мм. В этом случае повышается вероятность появления дефектов (несплошностей) клеевого слоя, что на фоне снижения прочности (таблица 2) относительно твердого (таблица 3) и хрупкого клеевого слоя может инициировать развитие трещины и вызвать потерю герметичности.

**IV. Заключение**

С целью выявления причины разгерметизации нефтепромысловых трубопроводов проведены лабораторные механические испытания по определению прочности адгезионного соединения базовых элементов трубопровода «стальная втулка – герметик – полимерное покрытие трубы» на стандартных образцах в виде склейки, имитирующей данную комбинацию материалов.

Определен показатель адгезии герметика Г-039 З к антикоррозионному полимерному покрытию трубы и поверхности втулки из нержавеющей стали методом отрыва. Сделан вывод о когезионном характере разрушения и достаточно высокой прочности соединения при минимальной толщине клеевого слоя.

Вместе с тем испытания показали, что при увеличении толщины клеевого слоя существенно снижается прочность герметика и меняется механизм разрушения от когезионного к смешанному (когезионно-адгезионному), а при максимально возможной толщине (8 мм) – адгезионному разрушению. Следовательно, при значительном монтажном зазоре формируется довольно хрупкий и недостаточно эластичный клеевой слой большой толщины, трещинообразование в котором является причиной потери герметичности.

**Библиографический список**

1. Фрейдин А. С., Турусов Р. А. Свойства и расчет адгезионных соединений. М.: Химия, 1990. 256 с.
2. ГОСТ 32299-2013 (ISO 4624:2002). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. Введ. 2014-08-01. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.
3. Машина для механических испытаний INSTRON модели 5567: руководство по эксплуатации. 2013. 59 с.

*Дата поступления статьи: 30.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 07.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. П. Сазанков, С. В. Шилько, Т. В. Дробыш, 2023

*Д. В. Скакун<sup>1</sup>, А. А. Теплоухов<sup>1</sup>, Н. А. Семенюк<sup>1</sup>, А. Г. Закалина<sup>1</sup>, Г. М. Серопян<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ КЕРАМИК НА МИКРОТВЕРДОСТЬ**

**Аннотация.** Получены образцы керамики на основе диоксида циркония, модифицированной диоксидами церия и титана. Проведено исследование зависимости микротвердости керамики на основе диоксида циркония, модифицированной оксидами церия и титана, от режимов и температуры спекания. Установлено, что повторное тепловое воздействие в процессе спекания приводит к деградации прочностных свойств керамики. Проведено сравнение значений микротвердости полученной керамики с разной концентрацией стабилизаторов. Наибольшие значения микротвердости получены при температуре спекания 1000 °С с добавкой диоксида титана. Проведён морфологический анализ по микрофотографиям поверхности, полученным методом РЭМ.

**Ключевые слова:** циркониевая керамика, оксид церия, микротвердость.

### **I. Введение**

Циркониевая керамика в силу таких свойств, как высокая твердость, тепло- и термостойкость, давно используется в качестве огнеупоров в промышленности, в медицине из-за хорошей совместимости. Модифицирующие добавки, например, диоксиды церия, титана в концентрациях 10–15% позволяют значительно менять свойства циркониевой керамики [1, 2]. При этом, чтобы добиться приобретения новых свойств, часто требуется контроль за определенными характеристиками, такими как твердость. Поэтому исследования, направленные на получение технологических решений, позволяющих сохранить или контролируемо изменить одно или несколько важных свойств, являются актуальной задачей материаловедения.

### **II. Постановка задачи**

Задачами данной работы являются исследование взаимосвязи микротвердости керамики составов  $ZrO_2$ -88%,  $CeO_2$ -12% и  $ZrO_2$ -88%,  $CeO_2$ -8%,  $TiO_2$ -4% и температуры спекания, получение микрофотографий керамики, полученной при разных режимах и температурах спекания, для анализа морфологии поверхности.

### **III. Методика эксперимента**

В процессе получения керамики были использованы мелкодисперсные порошки диоксида циркония, диоксида церия, диоксида титана с размерами частиц ~150 мкм. Предварительная сушка для удаления влаги проводилась в течение часа при температуре 105 °С. Просеивание проводилось на ситах Haver & Boecker с использованием ультразвуковой установки. Взвешивание порошков проводилось на аналитических весах OHAUS Pioneer PA-214C с точностью взвешивания до 0,0001 г. С целью получения гомогенного состава порошки заданной концентрации были перемешаны в механоактивирующей машине (ММ).

Исследуемые образцы представляли собой керамические цилиндры диаметром 15 мм, высотой 5 мм и массой 3 г. Прессование в цилиндрической пресс-форме проводилось при давлении 218 МПа. Спрессованные образцы спекались в один этап при температурах 700 °С и 1000 °С и в двухэтапном режиме 700 °С +1250 °С и 1000 °С +1250 °С. Каждый этап

проходил в течение 6 часов в воздушной среде согласно программе нагрева в муфельной печи WiseTherm FHP-05, остывание образцов после каждого этапа производилось в закрытой печи в течение 8 часов.

#### IV. Результаты экспериментов

В таблице 1 представлен перечень полученных образцов с присвоенными им номерами.

Таблица 1

#### Полученные образцы керамики при различных температурах с присвоенными номерами

Давление, МПа	218			
Температура спекания, °С	700	1000	700+1250	1000+1250
ZrO <sub>2</sub> – 88%, CeO <sub>2</sub> – 12%	№1	№3	№5	№7
ZrO <sub>2</sub> – 88%, CeO <sub>2</sub> – 8%, TiO <sub>2</sub> – 4%	№2	№4	№6	№8

На растровом электронном микроскопе JEOL JCM-5700 с приставкой спектрометра JED-2300 получены микрофотографии поверхности образцов.

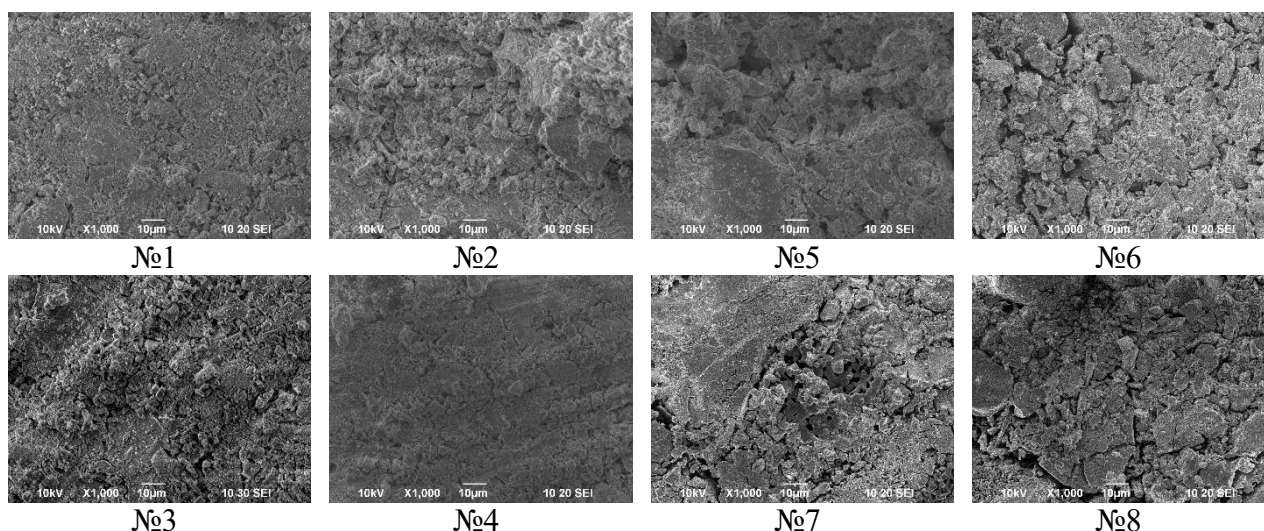


Рис. 1. Микрофотографии поверхности спеченных керамик при увеличении 1000 крат

По микрофотографиям видно, что образцы № 4, 3, 1, 2 с высокой микротвердостью имеют менее пористую структуру, также у них наблюдаются незначительные мелкие трещины. В то же время у образцов № 7, 8, 6, 5 с более низкой микротвердостью структура гораздо более пористая, наблюдаются глубокие поры и трещины.

На микротвердомере ПМТ-3М проведено исследование микротвердости керамик. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2

#### Микротвердость керамических образцов

Образец	HV	Образец	HV
№1	2043 ± 122	№5	208 ± 18
№2	733 ± 43	№6	255 ± 25
№3	2178 ± 130	№7	500 ± 44
№4	3524 ± 211	№8	301 ± 26

На основе данных таблицы 2 построена диаграмма, представленная на рис. 2.

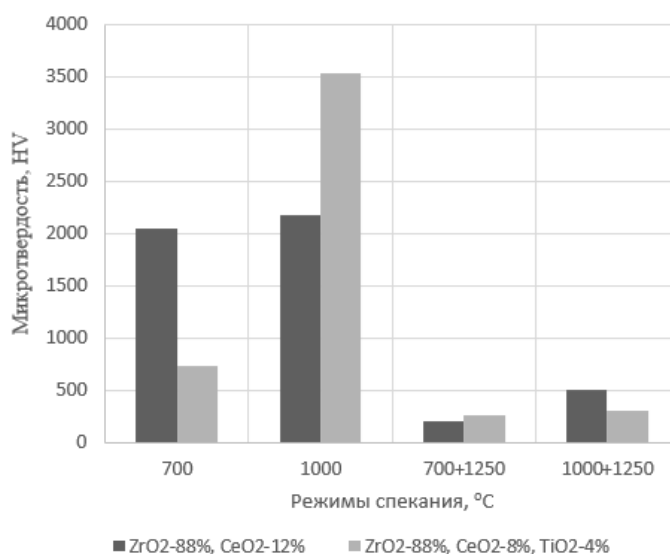


Рис. 2. Зависимость микротвердости керамики на основе диоксида циркония от составов модификаторов и режимов спекания

## V. Заключение

Проведено исследование зависимости микротвердости от режимов и температуры спекания керамики.

Установлено, что при двухэтапном спекании происходит резкое падение микротвердости образцов составов: ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-12% более чем в 4 раза и ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-8%, TiO<sub>2</sub>-4% более чем в 3 раза.

На микрофотографиях наблюдается рост трещин и увеличение пористости поверхности при двухэтапном спекании керамики составов: ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-12% и ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-8%, TiO<sub>2</sub>-4%.

Наибольшие значения микротвердости керамики составов ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-12% и ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-8%, TiO<sub>2</sub>-4% получены при температуре спекания 1000°C.

Значение микротвердости керамики состава ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-8%, TiO<sub>2</sub>-4% на 61% выше, чем у керамики состава ZrO<sub>2</sub>-88%, CeO<sub>2</sub>-12%, при температуре спекания 1000 °C и, наоборот, на 64% меньше при температуре спекания 700 °C.

Работа выполнена в рамках задания технологической группы для систем футеровки химических реакторов.

## Библиографический список

1. Девойно О. Г., Оковитый В. В. Композиционный порошок на основе диоксида циркония, частично стабилизированный оксидом церия // Наука и техника. 2013. № 6. С. 3–8.
2. Pandolfelli V. C., Rodrigues J. A., Stevens R. Effects of TiO<sub>2</sub> addition on the sintering of ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> compositions and on the retention of the tetragonal phase of zirconia at room temperature // J. of materials science. 1991. Vol. 26. P. 5327–5334.

Дата поступления статьи: 04.04.23

Дата одобрения после рецензирования: 15.06.23

Дата принятия к публикации: 19.06.23

© Д. В. Скакун<sup>1</sup>, А. А. Теплоухов<sup>1</sup>, Н. А. Семенюк<sup>1</sup>, А. Г. Закалина<sup>1</sup>, Г. М. Серопян<sup>2</sup>, 2023

*В. А. Стратанович, А. П. Сазанков, Д. В. Брель*

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси,  
г. Гомель, Беларусь

## **ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

**Аннотация.** Ввиду высокой производительности и экологической чистоты выбран способ обработки в низкотемпературной плазме тлеющего разряда в среде остаточных газов АБС-пластика и ленты Ф4К15М5. Экспериментально, с помощью методики *OWRK* (*Owens, Wendt, Rabel and Kaelble*) определения краевого угла смачивания, установлено, что указанный метод воздействия приводит к значительному увеличению поверхностной энергии исследуемых материалов. Доказано, что плазмохимическая обработка может приводить к увеличению адгезионной прочности клеевых соединений как минимум на 33%.

**Ключевые слова:** плазмохимическая обработка, смачиваемость, адгезионная прочность, адгезионное соединение, поверхностная энергия.

### **I. Введение**

Многие современные полимерные материалы, являясь весьма технологичными, износостойкими, коррозионно- и ударостойкими и т.д., плохо поддаются склейке, печати, окрашиванию, что представляет собой существенный недостаток. Решение данной проблемы может быть достигнуто путем внедрения модификаторов при производстве или более экологичным способом: обработкой в низкотемпературной плазме тлеющего разряда [1, 2].

Цель настоящей работы – исследование влияния плазмохимической обработки (ПХО) на прочность адгезионных соединений АБС-пластика и ленты Ф4К15М5.

### **II. Методика исследований**

В рамках настоящей работы исследована прочность адгезионного соединения:

- 1) АБС-пластика, используемого для серийного производства капотов и других деталей сельскохозяйственной техники *John Deere*;
- 2) ленты Ф4К15М5 по ТУ 6-05-05-138-80, используемой в производстве направляющих скольжения металлорежущих станков.

ПХО проводили на лабораторной установке [3], оснащенной генератором плазмы с базовой частотой  $f = 32$  кГц. Обработку обозначенных материалов проводили в остаточных газах (остаточном воздухе) при следующих режимах: давление остаточных газов 20 Па, напряжение питания генератора 160 В, что приблизительно обеспечивает порядка 80 Вт мощности, введенной в плазму, длительность воздействия составляла 1 мин.

Основным критерием, определяющим качество плазмохимического модифицирования, является показатель поверхностной энергии. Измерение полной поверхностной энергии, а также ее дисперсионных и полярных компонент проводили расчетным методом, основываясь на измерениях краевых углов смачивания поверхности образцов по методике [4] *OWRK* двумя различными жидкостями: глицерином чистый для анализов (ЧДА) по ГОСТ 6259-75 и дистиллированной водой фиксированного объема (10 мкл). Краевой угол смачивания измеряли с помощью оптического микроскопа МИР-2, оснащенного видеоокуляром *TourCam SCMOS02000KPA*, связанным с персональным компьютером (ПК). Обработка изображений капель жидкостей, а также расчёт углов

смачивания осуществлялись с помощью программного комплекса «ImageJ» с использованием плагинов *Contact angle* и *Drop analysis*.

Нагрузку, необходимую для разрушения клеевых соединений, определяли на разрывной машине INSTRON 5567. Прочность соединений исследовалась по ГОСТ Р 57066-2016 (скорость перемещения захватов 13 мм/мин). Склейку проводили в соответствии с указанными стандартами эпоксидным клеем ЭД-20 с отвердителем в пропорции 10:1 масс. Испытания проводили как минимум на 5 образцах.

Расчет адгезионной прочности клеевых соединений для обработанных и исходных материалов проводили по формуле:

$$A = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где  $A$  – расчетная адгезионная прочность в соединении, МПа,  $F$  – разрывное усилие, необходимое для разрушения клеевого соединения, Н,  $S$  – площадь соединения, мм<sup>2</sup>.

### III. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ниже представлены данные, а также фотографии капель на поверхности образцов (рис. 1), отражающие влияние ПХО на краевой угол смачивания, компоненты поверхностной энергии и ее полное значение, а также на адгезионную прочность (рассчитанную по формуле (1)) исследуемых материалов.

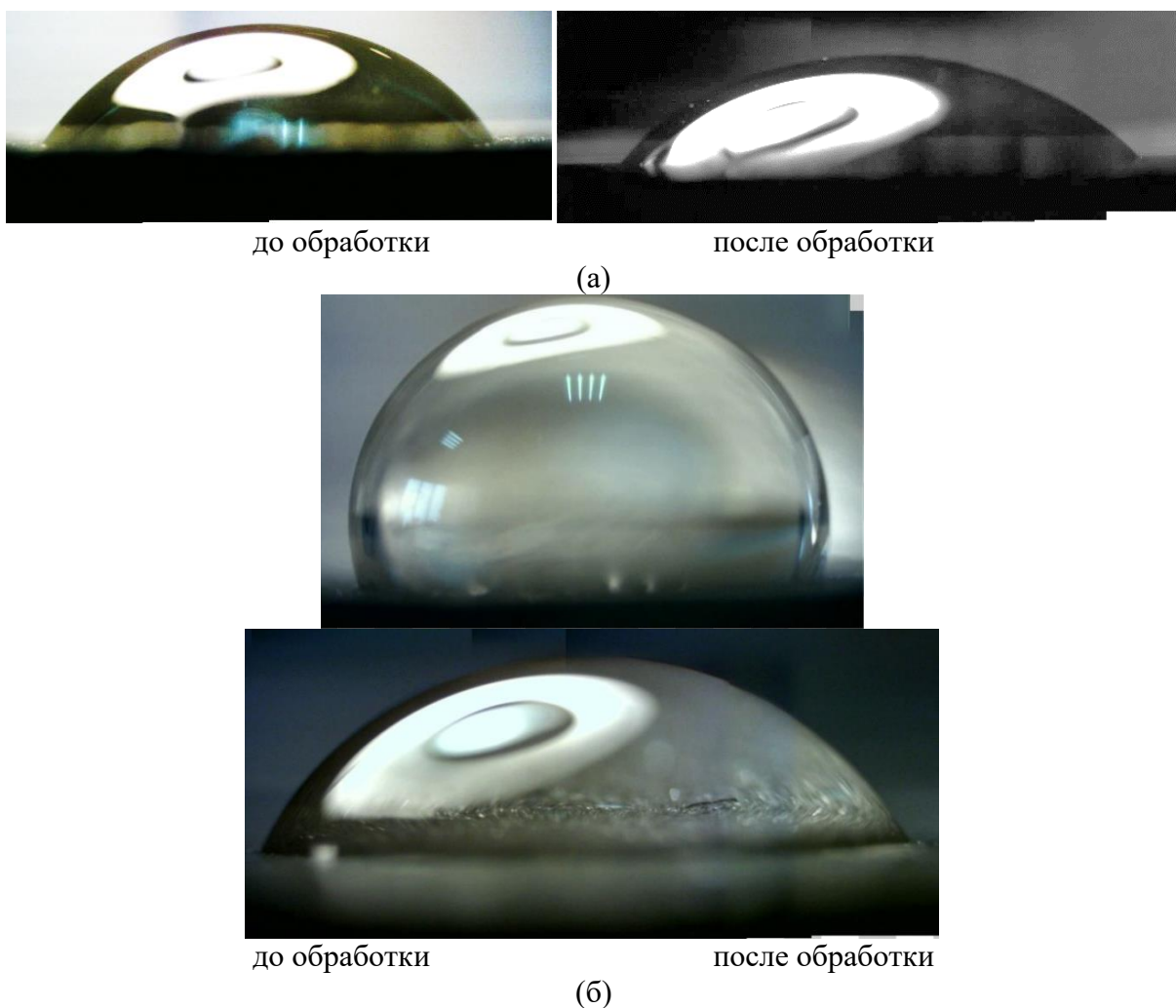


Рис. 1. Фотоснимки краевого угла смачивания водой АБС пластика (а) и ленты Ф4К15М5 (б)



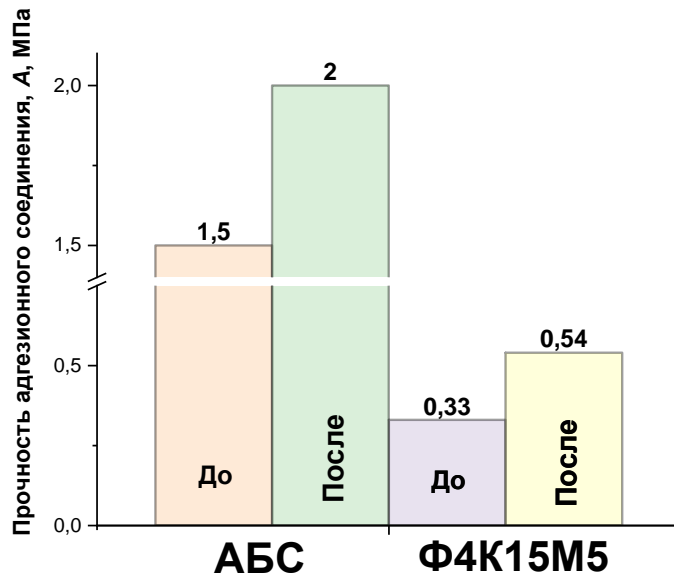


Рис. 2. Экспериментальные диаграммы адгезионной прочности АБС пластика и ленты Ф4К15М5 до и после плазмохимической обработки

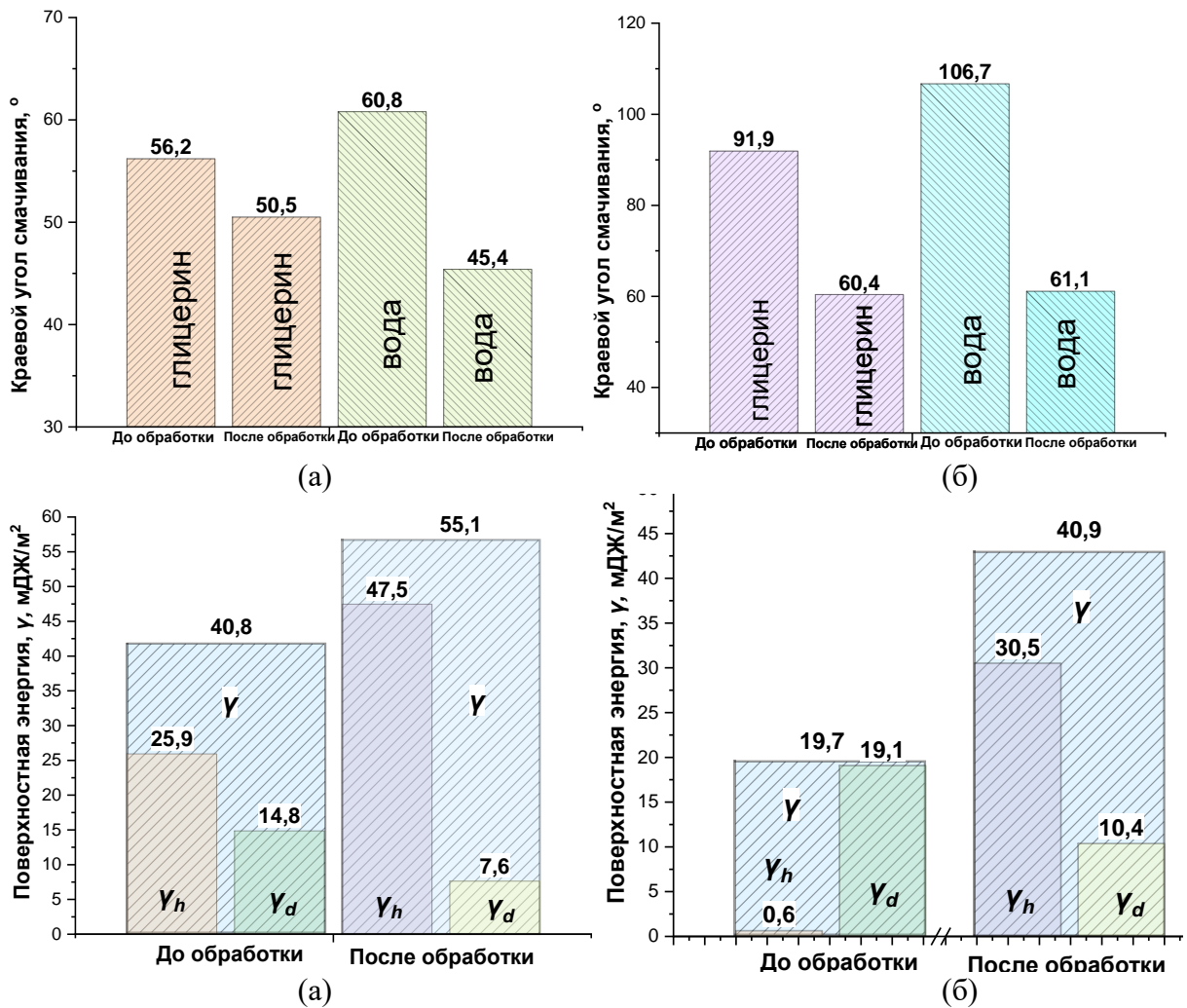


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы краевого угла смачивания, полной поверхностной энергии  $\gamma$  и ее полярного  $\gamma_h$  и дисперсионного  $\gamma_d$  компонента для АБС пластика (а) и ленты Ф4К15М5 (б)

Экспериментальные данные свидетельствуют о существенном возрастании прочности адгезионного соединения после ПХО (рис. 2). Увеличение прочности для АБС пластика составляет 33%, для ленты Ф4К15М5 – 63% по сравнению с необработанными образцами.

При подготовке образцов замечено более равномерное распределение клеевого агента на поверхности образца, что позволяет формировать клеевые соединения большей адгезионной прочности, а следовательно, и увеличить их надежность и долговечность. Более значительный прирост адгезионной прочности у ленты Ф4К15М5 может быть объяснен большим увеличением поверхностной энергии по сравнению с АБС-пластиком (рис. 3).

Повышение поверхностной энергии является следствием химических процессов, протекающих в поверхностных слоях: сшивания или деструкции макромолекул в приповерхностном слое. Также определенный вклад может вносить локальный разогрев поверхности, обезгаживание и удаление адсорбированных газовых слоев и низкомолекулярных загрязнений [3].

#### **IV. Заключение**

Установлено, что кратковременная обработка в низкотемпературной плазме остаточных газов позволяет значительно увеличить поверхностную энергию АБС-пластика и ленты Ф4К15М5 и, как следствие, повысить прочность адгезионного соединения. Доказанная экспериментально эффективность ПХО позволяет рекомендовать данный способ в производстве полимеров с повышенными адгезионными характеристиками.

#### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность Макаренко В. М. за содействие в проведении исследований.

Работа выполнена в рамках задания 4.2.2 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

#### **Библиографический список**

1. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. М.: Мир, 1988. 376 с.
2. Саркисов О. А. Поверхностное ионно-плазменное модифицирование полимерных материалов с целью повышения их адгезионных свойств: дис. ... к-та техн. наук. Гомель, 2018. 157 с.
3. Гракович П. Н., Толстопятов Е. М., Иванов Л. Ф. [и др.]. Установка для плазмохимической обработки углеродных тканей // IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: сборник трудов, 13 – 17 сентября 2021 г. Иваново, 2021. с. 101.
4. Kwok D. Y., Neumann A. W. Contact angle measurement and contact angle interpretation // *Advances in Colloid and Interface Science*. 1999. Vol. 81, is. 3, P. 167–249. Doi: 10.1016/S0001-8686(98)00087-6.

*Дата поступления статьи: 30.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 15.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. А. Стратанович, А. П. Сазанков, Д. В. Брель, 2023

Тянь Дэфан<sup>1</sup>, В. О. Алексенко<sup>2</sup>, Д. Ю. Степанов<sup>2</sup>, А. В. Бяков<sup>2</sup>, Д. Г. Буслович<sup>2</sup>, С. В. Панин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПЛАСТИН ПЭЭК И ПРЕПРЕГА ИЗ УВ-ТКАНИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Аннотация.** Приложение ультразвуковых (УЗ) колебаний является одним из распространенных способов сварки термопластов или слоистых композитов (ламинатов). Оптимальные параметры УЗ-сварки при разных ее режимах могут существенно отличаться. Аспект подбора рационального (оптимального) сочетания управляющих параметров УЗ-сварки (в частности, времени, давления прижима, амплитуды, частоты и пр.) может определяться с использованием методов многокритериальной оптимизации. Одним из эффективных подходов являются методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей. В работе из множества моделей, созданных по экспериментальным и априорным данным, были выбраны две наиболее различающиеся между собой модели, обеспечивающие минимально допустимую среднеквадратическую ошибку аппроксимации и исключающие избыточную нелинейность аппроксимации. Проведена экспериментальная верификация результатов моделирования, показавшая, что определенный с помощью нейросетевого моделирования режим обеспечивает достижение высоких прочностных свойств и сохранение структурной целостности ткани, армированной углеродным волокном.

**Ключевые слова:** ультразвуковая сварка, углеродное волокно, препрег, ПЭЭК, нейросетевое моделирование.

### **I. Введение**

Слоистые полимерные композиционные материалы, армированные непрерывным углеродным волокном (УВ), – ламинаты – находят широкое применение в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях промышленности [1]. Основной задачей является решение проблемы соединения армированных композитов [2–4]. Показано, что для композитов на основе термопластических связующих эффективным методом решения данной задачи является ультразвуковая сварка (УЗС) [5].

В рамках развития аддитивных технологий изготовления полимеров и композитов Khatri et al. исследовали эффективность ультразвуковой сварки напечатанных на 3D-принтере деталей как из чистого полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), так и из композитов, армированных углеволокном [6]. Было высказано предположение, что такие процедуры УЗС, разработанные для высокоэффективных термопластов, напечатанных на 3D-принтере, могут быть реализованы для изготовления как ненесущих, так и несущих конструкций.

С позиции практического применения различают непрерывную и точечную ультразвуковую сварку [7]. Показано, что оптимальные параметры УЗС при двух этих режимах могут существенно отличаться.

Вследствие разнообразия стратегий УЗС, а также оборудования и режимов воздействия УЗ-инструмента, аспект подбора рационального (оптимального) сочетания управляющих параметров УЗС (в частности, времени УЗС, давления прижима, амплитуды, частоты и пр.) может определяться с использованием методов многокритериальной оптимизации. Одним из эффективных подходов могут быть методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей (ИНС). Для планирования эксперимента и анализа результатов варьирования параметров УЗС авторами был применен метод Тагучи, в

то время как моделирование основывалось на нейронной сети с варьируемыми параметрами (количество нейронов и тип активационных функций, а также методы обучения).

Таким образом, целью данной работы является поиск оптимального сочетания параметров УЗС слоистого композита «ПЭЭК–ED(ПЭЭК) – препрег УВ-ткань (пропитанный ПЭИ) – ED(ПЭЭК) – ПЭЭК», а также оптимизация параметров их формирования с использованием нейросетевого моделирования (здесь ED – адгезионная пленка для УЗС).

## II. Материал и методы

В качестве фидстока для изготовления пластин использовали порошок ПЭЭК марки 770PF (Zeepeek, Китай). Для изготовления пластин применяли литьевую (плунжерную) машину RR/TSMF (Ray-Ran Test Equipment Ltd., Nuneaton, UK).

Для формирования неразъемных соединений в виде соединенных внахлест пластин использовали Energy Director (ED) из ПЭЭК-пленки толщиной 250 мкм (Victrex, Aptiv 2000). ED вырезали в виде квадратных фрагментов размером 22×22 мм, которые при УЗС помещали между ПЭЭК-пластинами и расположенным в центре соединяемого пакета препрегом из УВ-ткани. Для УЗ-соединения пластин использовали станок ультразвуковой сварки УЗПС-7 (ООО «СпецмашСоник», г. Воронеж). Свариваемые пластины помещали в фиксирующую струбцину, исключая возможность их взаимного перемещения. Испытательные образцы включали пять слоев, а именно два внешних слоя РЕЕК, центральный слой препрега и два промежуточных ED. УЗС соединений внахлест проводили при варьировании: времени УЗ-сварки  $t_{УЗ} = 600 \div 1100$  мс; времени прижима после УЗ-сварки  $\tau_{приж} = 2000 \div 8000$  мс; давления прижима  $P_{приж} = 1,5 \div 2,5$  атм.

Прочностные характеристики сварных соединений внахлест оценивали при испытаниях на растяжение в соответствии со стандартом ASTM D5868. Испытания проводились на электромеханической машине «Instron 5582» (Instron, США). Скорость перемещения подвижного захвата составляла 13 мм/мин.

Структуру поперечного сечения соединений внахлест анализировали с помощью оптического микроскопа «Neophot 2» (ОМ; Carl Zeiss, Jena, Germany) после окончания испытаний на растяжение.

## III. Результаты исследования и их обсуждение

По аналогии с методикой, изложенной в [8], для выбранных параметров УЗС были выбраны двусторонние ограничения, определяющие область оптимальных параметров (таблица 1).

Таблица 1

### Пороговые значения условия оптимальности

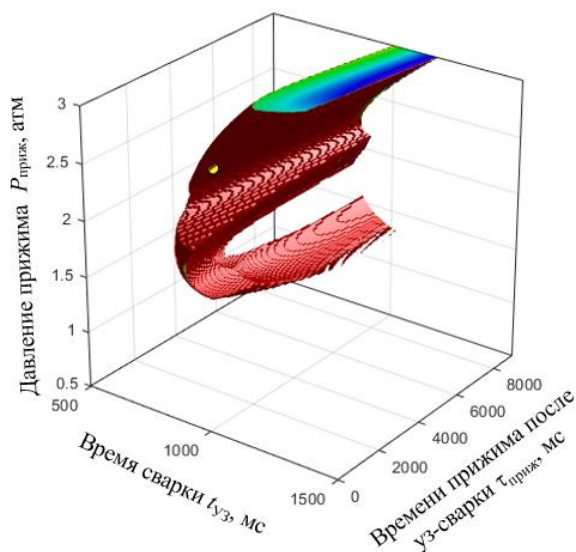
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	$30 < \sigma_B < 60$
Удлинение $\varepsilon$ , мм	$2,0 < \varepsilon < 3,5$
Интегральное изменение толщины после УЗС $\Delta d$ , мм	$0,15 < \Delta d < 0,50$
Среднее расстояние между ПЭЭК-пластинами после УЗС $d_{adh}$ , мкм	$550 < d_{adh} < 750$
Толщина слоя углеткани после УЗС $d_{УВ}$ , мкм	$170 < d_{УВ} \leq 350$

Среди множества моделей, созданных по экспериментальным и априорным данным, были выбраны две наиболее различающиеся между собой модели, обеспечивающие минимально допустимую (приемлемую) среднеквадратическую ошибку аппроксимации (ограничение снизу) и исключаящие избыточную нелинейность аппроксимации (вследствие переобученности сетей, как ограничение сверху).

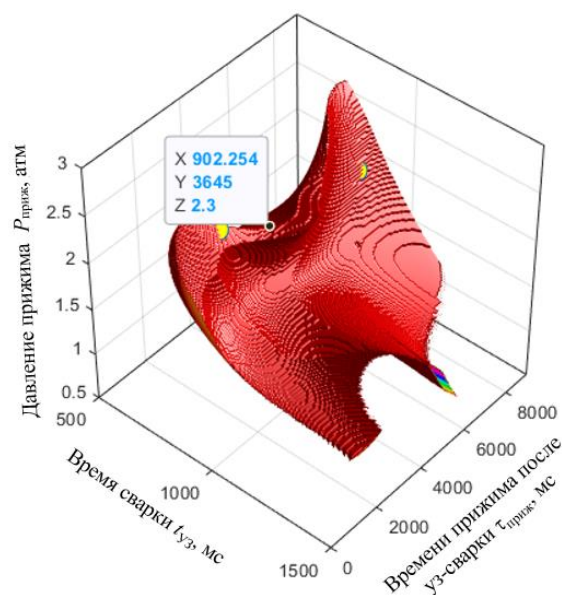
Результаты определения области оптимальности параметров для этих моделей представлены на рис. 1а, 1б. Обе модели выявили сложный характер такой области и неоднозначность решения поставленной задачи.

**Модель №1.** Сеть прямого распространения (feedforward back propagation, FNN) с 6 нейронами в скрытом слое и активационными функциями: линейной в скрытом слое и гиперболическим тангенсом на выходе. Обучение проводилось на выборке нормированных данных (с нулевым средним и единичной дисперсией). Выборка добавлена синтезированным набором данных, полученным случайным разбросом нормированных экспериментальных данных с равномерным законом распределения  $[-0,05, 0,05]$ .

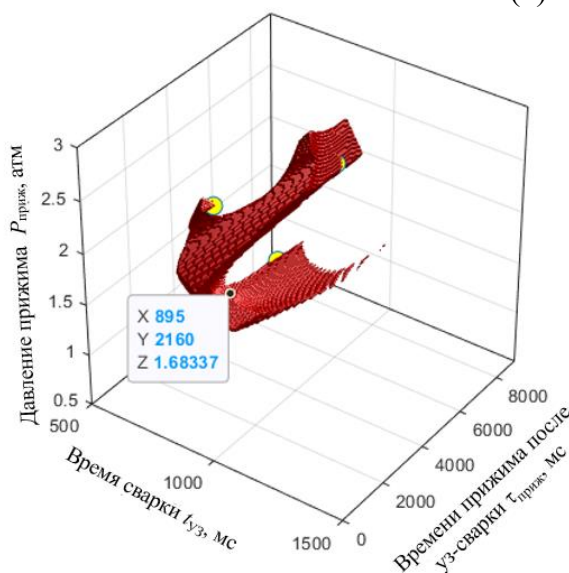
**Модель №2.** Радиальная базисная сеть с минимальным числом нейронов (Radial Basis Network, RBN). Параметры модели определялись из анализа исходных данных: Spread of radial basis functions 0,35 и Mean squared error goal 0,0001. Обучение проводилось на выборке нормированных данных (с нулевым средним и единичной дисперсией).



(а) модель №1



(б) модель №2



(в) пересечение областей

Рис. 1. Области оптимальных параметров, построенные по результатам нейросетевого моделирования. ● – параметры экспериментов, отвечающие условию оптимальности

Для выявления общих закономерностей моделирования была выполнена операция пересечения областей оптимальных параметров по двум моделям (рис. 1в). В качестве

параметров для верификации моделей была выбрана параметры  $t_{у3}=900$  мс,  $P_{приж}=1,7$  атм и  $\tau_{приж}=2\ 000$  мс (указана на рис. 1в, далее обозначена как режим №10).

#### IV. Верификация нейросетевой модели

В таблицах 2–3 приведены данные механических испытаний соединений внахлест, изготовленных на основании поиска оптимальных режимов УЗС. При этом происходило заметное утонение свариваемого пакета  $\Delta h=430$  мкм. Это означает, что УЗС сопровождалось заметным фрикционным нагревом и пластическим деформированием как препрега, так и EDs (таблица 2). Согласно данным таблицы 3 толщина «слоя УВ-ткани» сохранилась практически на исходном уровне  $d_{уВ}\sim 270$  мкм, хотя расстояние между ПЭЭК-пластинами сократилось до 560 мкм (согласно данным оптических измерений, рис. 2а).

Таблица 2

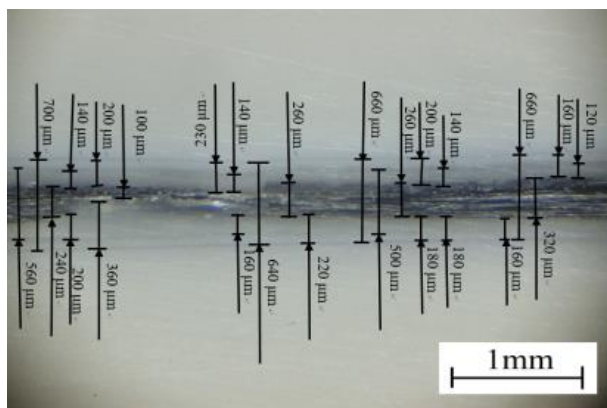
**Механические и конструктивные характеристики соединений УЗС для оптимизированных параметров УЗВ на основе моделирования нейронных сетей**

Номер эксперимента (режима)	Предел прочности при растяжении $\sigma_{UTS}$ , МПа	Удлинение при разрыве $\epsilon$ , %	Работа разрушения А, Н·м	Модуль упругости, Е, МПа	Уменьшенная толщина УЗС $\Delta h$ , мм
10	47,1	2,7	64,3	2197	0,43

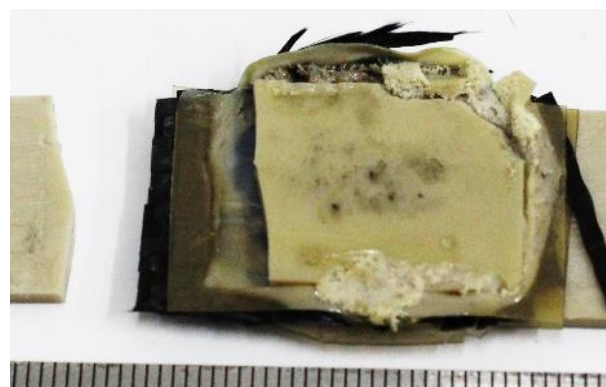
Таблица 3

**Значения параметров структуры УЗ-соединений внахлест, сформированного на основе оптимизированных параметров УЗС по данным нейросетевого моделирования**

Режим	Исходная толщина соединяемого пакета, мм	Толщина неразъемного соединения после УЗС, мм	Расстояние между пластинами ПЭЭК после УЗС, мкм	
			контактно	по фото
10	5,11	4,68	560±60	270±30



(а)



(б)

Рис. 2. Оптическое изображение поперечного сечения (а) и общий вид разрушенного соединения внахлест после испытания на растяжение (б) образца, УЗ-сваренного по режиму №10

На основании результатов верификации данных нейросетевого моделирования в качестве оптимального был выбран режим №10. В таблице 4 представлены его ключевые механические свойства.

**Механические свойства соединений внахлест, полученных по режиму №10**

Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Модуль упругости $E$ , ГПа	Удлинение до разрушения $\varepsilon_f$ , %	Условный предел текучести 0,2% $\sigma_{0,2}$ , МПа
66,7	3,91	1,9	64,4

**V. Выводы**

С использованием двух типов нейронных сетей на основании выборки из экспериментальных данных, расширенной данными экспертных оценок, определен «оптимальный» режим УЗС соединений «ПЭЭК – ED(ПЭЭК) – препрег УВ-ткань (пропитанный ПЭИ) – ED(ПЭЭК) – ПЭЭК». Проведена экспериментальная верификация результатов моделирования, показавшая, что режим №10 обеспечивает достижение высоких прочностных свойств и сохранение структурной целостности УВ-ткани.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0010, и при поддержке проекта Российского научного фонда № 21-19-00741.

**Библиографический список**

1. Liu G., Xiong Y., Zhou L. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications // Composites Communications. 2021. Vol. 27, P. 100907.
2. Yassin K., Hojjati M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2017. Vol. 31, no. 12. P. 1676–1725.
3. Bhudolia S. K., Gohel G., Leong K. F. [et al.]. Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review // Materials. 2020, Vol. 13, no. 6. P. 1284. Doi:10.3390/ma13061284.
4. Benatar A. Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites // Power Ultrasonics. 2015. P. 295–312. Doi:10.1016/B978-1-78242-028-6.00012-0.
5. Villegas I. F. Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 6. P. 291. Doi:10.3389/fmats.2019.00291.
6. Khatri B., Roth M.F., Balle F. Ultrasonic Welding of Additively Manufactured PEEK and Carbon-Fiber-Reinforced PEEK with Integrated Energy Directors // J. Manuf. Mater. Process. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 2.
7. Zhao Q., Wu H., Chen X. [et al.]. Insights into the structural design strategies of multi-spot ultrasonic welded joints in thermoplastic composites: A finite element analysis // Composite Structures. Nov. 2022. Vol. 299. P. 115996.
8. Panin S. V., Stepanov D. Y., Byakov A. V. Optimizing Ultrasonic Welding Parameters for Multilayer Lap Joints of PEEK and Carbon Fibers by Neural Network Simulation // Materials. 2022. Vol. 15, no. 19. P.6939.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 10.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Тянь Дэфан, В. О. Алексенко, Д. Ю. Степанов, А. В. Бяков, Д. Г. Буслович, С. В. Панин, 2023

*А. Р. Халдеева, М. Л. Давыдова, А. Ф. Федорова, М. Д. Соколова*  
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА РЕЗИН НА ОСНОВЕ HYDRIN T6000**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния тиурамовой (ТСУ), гуанидиновой (ГСУ) и тиурамо-гуанидиновой (ТГСУ) систем ускорителей вулканизации на вулканизационные характеристики резиновых смесей, структурные параметры пространственной сетки и физико-механические свойства резин на основе эпихлоргидринового каучука (ЭХГК) марки Hydrin T6000. Выбор ускорителей вулканизации основан на возможности получения вулканизационной пространственной структуры разной сульфидности. Установлено, что введение в резину ТСУ приводит к образованию более густой пространственной сетки за счет образования моно- и дисульфидных связей, ГСУ – к образованию полисульфидных связей. При введении ТГСУ формируется вулканизационная структура поперечных связей различной сульфидности и определенной густоты.

**Ключевые слова:** эпихлоргидриновый каучук, вулканизирующая группа, ускоритель вулканизации, вулканизат, поперечная связь.

### **I. Введение**

Ускорители вулканизации вводятся в резиновую смесь для ускорения процесса вулканизации и оказывают огромное влияние на тип химических связей в резине. Как правило, наилучшим комплексом свойств обладают статистически распределенные по объему материала вулканизаты, содержащие поперечные связи различной термостабильности. В зависимости от типа используемого ускорителя вулканизации могут образовываться полисульфидные  $-C-S_x-C-$ , дисульфидные  $-C-S-S-C-$ , моносульфидные  $-C-S-C-$ , углерод-углеродные  $-C-C-$  и др. связи [1–2]. Так, в присутствии ускорителей тиурамовой группы образуются моно- и дисульфидные связи, гуанидиновой группы – полисульфидные связи, а группы тиазолов – от углерод-углеродных до полисульфидных с различной степенью сульфидности [3]. Безусловно, оптимальный комплекс свойств вулканизатов достигается при использовании вулканизирующих систем из двух и более ускорителей вулканизации.

В связи с этим цель работы состояла в исследовании влияния двойных и тройных систем ускорителей вулканизации на свойства резиновых смесей и вулканизатов на основе эпихлоргидринового каучука марки Hydrin T6000.

### **II. Объекты исследования**

В качестве эластомерной матрицы использован эпихлоргидриновый каучук марки Hydrin T6000 с температурой стеклования  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , который представляет собой тройной термополимер эпихлоргидрина (ЭХГ – 12,4 масс. %), пропиленоксида (ПО – 83,7 масс. %) и аллилглицидилового эфира (АГЭ – 3,9 масс. %). В качестве вулканизирующего агента использовали серу, а в качестве ускорителей вулканизации применены широко используемые в резиновой промышленности ускорители – тетраметилтиурамдисульфид (тиурам, ТМТД), N,N' – дифенилгуанидин (дифенилгуанидин,ДФГ), 2-меркаптобензотиазол (каптакс, МБТ). Ускорители вводили в резиновую смесь в виде двойных и тройных систем: ТСУ – тиурамовая система; ГСУ – гуанидиновая система; ТГСУ – тиурамо-гуанидиновая система. Выбор ускорителей вулканизации основан на возможности получения вулканизационной пространственной структуры разной сульфидности. В таблице 1 приведен



состав вулканизирующей группы в рецептурах резиновых смесей. Резиновые смеси, кроме вулканизирующей группы, также содержат одинаковое количество следующих ингредиентов: технический углерод марки N774, пластификатор – дибутилсебацат, активатор вулканизации – оксиды цинка и магния, мягчитель – стеариновая кислота и противостаритель – 6PPD.

Таблица 1

**Состав вулканизирующей группы**

Вулканизирующая группа	Содержание, масс.ч. на 100 масс.ч. каучука											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ТСУ			ГСУ			ТГСУ					
Сера	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
2-меркаптобензотиазол	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
N,N'-дифенилгуанидин	-	-	-	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
Тетраметилтиурамдисульфид	0,5	1,0	1,5	-	-	-	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5

Резиновые смеси были изготовлены смешением на вальцах См 350 150/150 при температуре ~60 °С в течение 30 мин. Вулканизацию образцов проводили в вакуумном гидравлическом прессе Y1000D при температуре 155 °С. Оптимальную продолжительность вулканизации смесей подбирали по результатам исследований вулканизационных характеристик, представленным в таблице 2.

Вулканизационные характеристики резиновых смесей исследовали на безроторном анализаторе перерабатываемости резин RPA 2000 фирмы Alpha Technologies по ГОСТ Р 54547-2011. Параметры пространственной сетки резин определяли по уравнению Флори-Ренера на основании данных равновесного набухания в толуоле при температуре 30 °С [4]. Исследование физико-механических показателей, а также исследование морозостойкости при растяжении проведены на универсальной испытательной машине UTS-2K согласно ГОСТ 270-75 и ГОСТ 408-78 соответственно. Стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред определяли в соответствии с ГОСТ 9.030-74.

**III. Результаты и их обсуждение**

Результаты исследования вулканизационных характеристик резиновых смесей, структурных параметров пространственной сетки и физико-механических свойств вулканизатов на основе Hydrex T6000 приведены в таблице 2.

Видно, что вулканизационные характеристики резиновых смесей с разной системой ускорителей вулканизации имеют отличия. Резиновые смеси с ТСУ (№1–№3) характеризуются наибольшими значениями минимального и максимального крутящих моментов и более высокой скоростью вулканизации по сравнению с образцами ГСУ (№4–№6). Резиновые смеси с тройной системой ускорителей (ТГСУ) по значениям максимального крутящего момента и скорости вулканизации близки к тиурамовой системе, а по значениям минимального крутящего момента – к гуанидиновой. Комбинации ускорителей ТСУ и ТГСУ характеризуются меньшим временем оптимума вулканизации по сравнению с ГСУ, т.е. обеспечивают ускоренный процесс образования пространственной сетки вулканизата.

Таблица 2

## Свойства резиновых смесей и вулканизатов на основе Hydrin T6000

Показатели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ТСУ				ГСУ				ТГСУ			
Вулканизационные характеристики												
$M_L$ , дНм	3,08	2,80	3,01	2,53	2,63	2,73	2,52	2,45	2,30	2,75	2,66	2,59
$M_H$ , дНм	20,40	24,93	27,57	13,66	14,41	14,10	21,22	25,19	25,29	20,21	24,38	26,66
$\Delta(M_H - M_L)$ , дНм	17,32	22,13	24,56	11,13	11,78	11,36	18,70	22,74	22,99	17,46	21,72	24,07
$t_s$ , мин	1,63	1,89	2,05	2,91	2,30	1,75	1,65	1,87	2,00	1,85	1,79	1,74
$t_{90}$ , мин	13,62	12,37	11,16	18,64	15,57	15,36	14,26	13,11	11,79	15,06	13,50	11,63
$R$ , мин <sup>-1</sup>	8,34	9,54	10,97	6,35	7,53	7,34	7,93	8,89	10,21	7,57	8,53	10,11
Показатели пространственной сетки												
$M_c$ г/моль	12139,6	10857,9	9561,3	14834	14725,0	14616,8	10316,2	9636,3	9283,8	9775,4	8677,5	8134,3
$n_c \cdot 10^{-19}$ , см <sup>-3</sup>	5,29	5,88	6,69	4,30	4,34	4,37	6,24	6,62	6,88	6,53	7,36	7,69
$v_c \cdot 10^4$ , моль/см <sup>3</sup>	0,44	0,49	0,56	0,36	0,36	0,36	0,52	0,55	0,57	0,54	0,61	0,65
Свойства вулканизатов												
$f_p$ , МПа	10,1	9,9	11,0	8,2	9,9	10,1	10,6	9,9	9,4	9,4	9,5	9,4
$f_{100}$ , МПа	3,4	4,3	5,2	2,0	2,9	2,9	4,4	4,6	4,7	3,2	4,1	4,5
$\epsilon_p$ , %	421	279	270	637	498	494	295	267	251	439	306	286
$K_M$ при -55 °С	0,34	0,46	0,40	0,13	0,21	0,23	0,50	0,51	0,48	0,29	0,40	0,42
$\Delta Q$ , % (70 °Сx7 2 ч) СЖР-3	11,8	4,8	5,0	6,7	7,3	7,0	6,7	6,6	6,5	6,7	5,3	5,0

Примечание:  $M_L$  – минимальный крутящий момент,  $M_H$  – максимальный крутящий момент,  $t_s$  – время начала подвулканизации,  $t_{90}$  – оптимальное время вулканизации,  $R$  – скорость вулканизации,  $M_c$  – средняя молекулярная масса отрезка цепи между двумя соседними связями,  $n_c$  – концентрация поперечных связей, приходящихся на 1 см<sup>3</sup> вулканизата,  $v_c$  – плотность поперечного сшивания,  $f_p$  – условная прочность при растяжении,  $f_{100}$  – условное напряжение при 100%-м удлинении,  $\epsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве,  $K_M$  – коэффициент морозостойкости,  $\Delta Q$  – степень набухания.

Показатели пространственной сетки, полученные на основании данных равновесного набухания, характеризуют плотность сетчатых структур [5–6]. Также плотность поперечной сшивки вулканизатов можно косвенно оценить по разности крутящих моментов  $\Delta(M_H - M_L)$  [7]. Вулканизаты с ТСУ и ТГСУ имеют более густую пространственную сетку. С повышением содержания ТМТД в этих смесях видна тенденция увеличения плотности сетки. Наибольшие значения  $\Delta(M_H - M_L)$  наблюдаются у вулканизатов с максимальным количеством ускорителей – №3 и №12. По результатам определения структурных параметров пространственной сетки показано, что вулканизаты с ГСУ, у которых большей частью образуются полисульфидные поперечные связи, характеризуются более высокой молекулярной массой отрезка цепи, меньшим количеством поперечных связей и менее плотной вулканизационной сеткой. Вулканизаты с ТСУ по сравнению с ГСУ обладают меньшей молекулярной массой отрезка цепи между сшивками, большим количеством поперечных связей и соответственно более густой вулканизационной сеткой, что можно объяснить образованием преимущественно более коротких моно- и дисульфидных поперечных связей. Однако использование тройных систем ускорителей способствует образованию еще более густой пространственной сетки, характеризующейся большим количеством поперечных связей и меньшей молекулярной массой за счет образования поперечных связей с различной сульфидностью.

Результаты физико-механических свойств резин показали почти одинаковый уровень значений условной прочности при растяжении. Отличия наблюдаются в значениях условного напряжения при 100% удлинении, относительного удлинения при разрыве и коэффициента морозостойкости. Вулканизаты с более густой вулканизационной сеткой (ТСУ и ТГСУ) характеризуются высокими значениями условного напряжения при 100% удлинении. Данный показатель с увеличением содержания ТМТД от 0,5 до 1 масс.ч. повышается, а относительное удлинение падает. Высокое значение относительного удлинения при разрыве у резин (№4–6), содержащих ГСУ, можно объяснить менее плотной вулканизационной сеткой за счет образования полисульфидных связей. Высокую морозостойкость при  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  показали вулканизаты с ТСУ и ТГСУ. Коэффициент морозостойкости у вулканизатов с ТГСУ почти в два раза выше по сравнению с резинами с ГСУ. Вероятно, это обусловлено сформировавшейся вулканизационной сеткой определенной густоты, т.к. повышение морозостойкости может происходить до достижения определенной критической густоты плотности сетки [8]. Наибольшей морозостойкостью обладают вулканизаты №7 и №8, содержащие по 0,5 масс.ч.ДФГ и 0,5–1 масс.ч.ТМТД. Лучшей стойкостью в среде СЖР-3 (меньшими значениями степени набухания) также обладают резины с тройной комбинацией ускорителей. Итак, наилучшим комплексом свойств обладают вулканизаты №7 и №8, содержащие 1,5 масс.ч. каптакса, 0,5 масс.ч.ДФГ и 0,5–1,0 масс.ч.ТМТД.

#### IV. Заключение

Таким образом, вулканизаты, отличающиеся содержанием, количеством и соотношением ускорителей ДФГ и ТМТД, имеют отличия в свойствах, обусловленные формированием пространственной структуры с разным типом поперечных связей и густоты. Установлено, что введение в резину ТСУ приводит к образованию более густой пространственной сетки за счет образования моно- и дисульфидных связей, ГСУ – к образованию полисульфидных связей. А введение ТГСУ приводит к формированию вулканизационной структуры поперечных связей различной сульфидности и определенной густоты, что соответственно приводит к улучшению таких важных эксплуатационных свойств как морозо- и агрессивностойкость. Наилучшим комплексом свойств обладают резины №7 и №8, содержащие 1,5 масс.ч. каптакса, 0,5 масс.ч.ДФГ и 0,5–1,0 масс.ч.ТМТД.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9, FWRS-2021-0004 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13. ЦКП.21.0016.

### Библиографический список

1. Ghorai S., Jalan A. K., Roy M. [et al.]. Turing of accelerator and curing system in devulcanized green natural rubber compounds // Journal Polymer testing. 2018. Vol. 69. P. 133–145.
2. Востриков Д. С., Бочкарев Е. С., Димитров П. В. [и др.]. Исследование влияния эффективных вулканизирующих систем на свойства резин на основе бутадиен-нитрильного каучука // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 12 (235). С. 126–131.
3. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
4. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
5. Honorato L., Lopes Dias M., Azuma C. [et al.]. Rheological properties and curing features of natural rubber compositions filled with fluoromica ME 100 // Polimeros. 2016. Vol. 26 (3). P. 249–253.
6. Lopez-Manchado M. A., Arroyo M. A., Herrero M. B. [et al.]. Vulcanization kinetics of natural rubber-organoclay nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2003. Vol. 89 (1). P. 1–15.
7. Новаков И. А., Вольфсон С. И., Новопольцева О. М. [и др.]. Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 332 с.
8. Чайкун А. М., Елисеев О. А., Наумов И. С. [и др.]. Особенности построения рецептур для морозостойких резин // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 53–55.

*Дата поступления статьи: 30.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 10.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Р. Халдеева, М. Л. Давыдова, А. Ф. Федорова, М. Д. Соколова, 2023

УДК 621.357.9

*А. Е. Шестериков, Д. А. Шестерикова*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ЗОЛОТА И ОЛОВА В ПРОГРАММАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**Аннотация.** В статье представлен подход к моделированию послойного электрохимического осаждения для определения оптимальной конструкции используемой оснастки. В ходе моделирования была подобрана оптимальная конструкция ванны для электрохимического

осаждения (одноанодная система) и найдено оптимальное расстояние между катодом и анодом, равное  $H = 10$  см.

**Ключевые слова:** электрохимическое осаждение, преформы, эвтектика, золото, олово.

## I. Введение

Ключевым этапом в сборке полупроводниковых приборов является процесс монтажа кристалла. Данная операция влияет на надежность всего изделия в целом. Наиболее надежным и качественным методом монтажа является вакуумная пайка с использованием преформ из эвтектики [1]. Самой часто используемой эвтектикой является двойной сплав  $Au_{80}Sn_{20}$ , т.к он отлично сочетается с золотой металлизацией кристаллов и демонстрирует высочайшую надежность и стабильность. Перспективным методом получения необходимой эвтектической композиции является послойное электрохимическое осаждение слоев золота и олова в требуемом соотношении. Осаждение необходимо производить с точностью до единиц массовых процентов, так как изменение соотношения золота и олова в эвтектической композиции на 1% вызывает увеличение температуры плавления на  $30$  °C [2], что является критическим значением при монтаже кристалла с использованием данного припоя. Все эти факторы предъявляют жесткие требования к используемой оснастке для электрохимического осаждения. В данной статье представлен подход к моделированию послойного электрохимического осаждения для определения оптимальной конструкции используемой оснастки.

## II. Математическая модель электрохимического осаждения

Рассмотрим математическую модель для осаждения олова из сульфатных электролитов. В результате диссоциации в электролите будут присутствовать ионы  $Sn^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$ . Поток для каждого из ионов  $N$  определяется уравнением Нернста-Планка [3]:

$$N = -D \cdot \nabla C - z \cdot u \cdot F \cdot C \cdot \nabla \varphi, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация ионов в области электролита (моль/м<sup>3</sup>),  $z$  – степень ионизации,  $u$  – подвижность заряженных частиц (м<sup>2</sup>/(с·Дж·моль)),  $F$  – постоянная Фарадея (А·с/(моль)),  $\varphi$  – потенциал области электролита (В).

Уравнение массового баланса имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla N = 0. \quad (2)$$

Условия электронейтральности области электролита задается выражением:

$$\sum_i z_i \cdot C_i = 0. \quad (3)$$

Также введем граничное условие для катода по уравнению Батлера-Вольмера:

$$\begin{aligned} Sn^{2+} + e^- &= Sn^+; \\ Sn^+ + e^- &= Sn. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом этого локальная плотность тока как функция потенциала и концентрации будет задаваться выражением:

$$j = j_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{3 \cdot F \cdot \eta}{2 \cdot R \cdot T}\right) - \frac{C_{Sn^{2+}}}{C_{Sn^{+}}} \cdot \exp\left(\frac{F \cdot \eta}{R \cdot T}\right) \right), \quad (5)$$

где  $\eta$  – перенапряжение,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура электролита.

Таким образом, уравнения потоков для катода и анода запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \text{катод: } N_{Sn^{2+}} \cdot \bar{n} &= \frac{j_0}{2 \cdot F} \cdot \left( \exp\left(\frac{3 \cdot F \cdot \eta_k}{2 \cdot R \cdot T}\right) - \frac{C_{Sn^{2+}}}{C_{Sn^{2+}_{исх}}} \cdot \exp\left(\frac{F \cdot \eta_k}{R \cdot T}\right) \right); \\ \text{анод: } N_{Sn^{2+}} \cdot \bar{n} &= \frac{j_0}{2 \cdot F} \cdot \left( \exp\left(\frac{3 \cdot F \cdot \eta_a}{2 \cdot R \cdot T}\right) - \frac{C_{Sn^{2+}}}{C_{Sn^{2+}_{исх}}} \cdot \exp\left(\frac{F \cdot \eta_a}{R \cdot T}\right) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Для всех внешних границ задается изолирующее условие:

$$\begin{aligned} N_{Sn^{2+}} \cdot \bar{n} &= 0; \\ N_{SO_4^{2-}} \cdot \bar{n} &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

Итак, математическая модель получена, первой задачей, которую необходимо решить, является выбор конструкции ванны для электрохимического осаждения. Конструкция должна обеспечивать наилучшую равномерность получаемого на катоде покрытия. В рамках данной задачи были рассмотрены двуханодная и одноанодная система электрохимического осаждения.

### III. Результаты и их анализ

Равномерность покрытия для системы характеризуется равномерностью распределения электрического поля в области катода. На рис. 1 представлены диаграммы распределения электрического поля для двух систем осаждения.

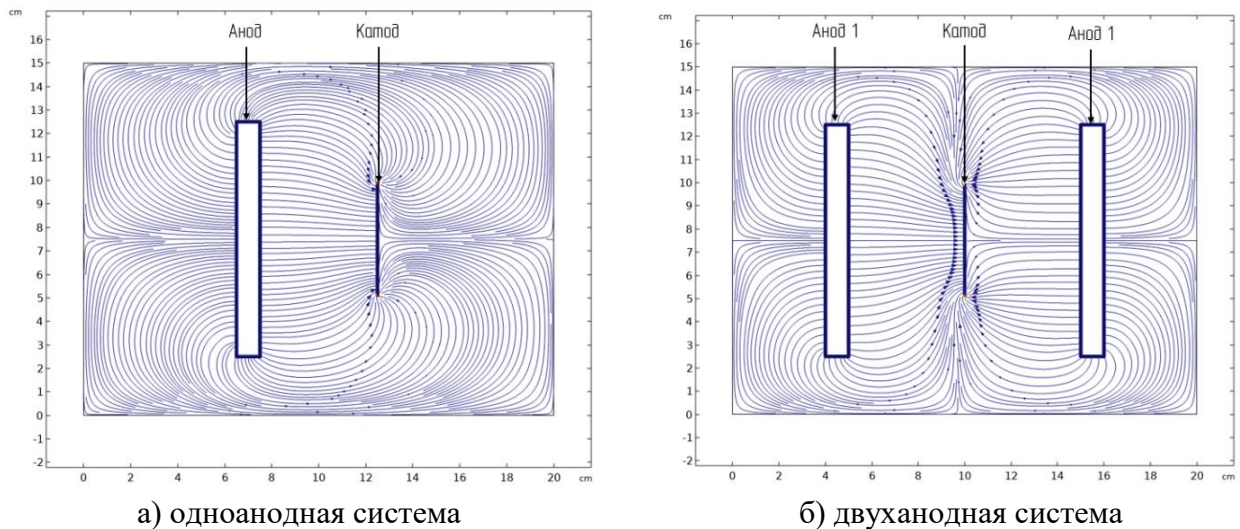


Рис. 1. Диаграммы распределения электрического поля

Из рис. 1 видно, что одноанодная система имеет более равномерное распределение электрического поля, поэтому ее использование предпочтительно.

Также важной характеристикой является расстояние между катодом и анодом. При его увеличении улучшается равномерность осаждения, но ухудшается его эффективность. Для подбора оптимального расстояния была исследована зависимость однородности покрытия от расстояния между катодом и анодом. На рис. 2 представлены профили осаждения олова в диапазоне времени от 0 до 30 с при расстоянии между электродами 7 см.

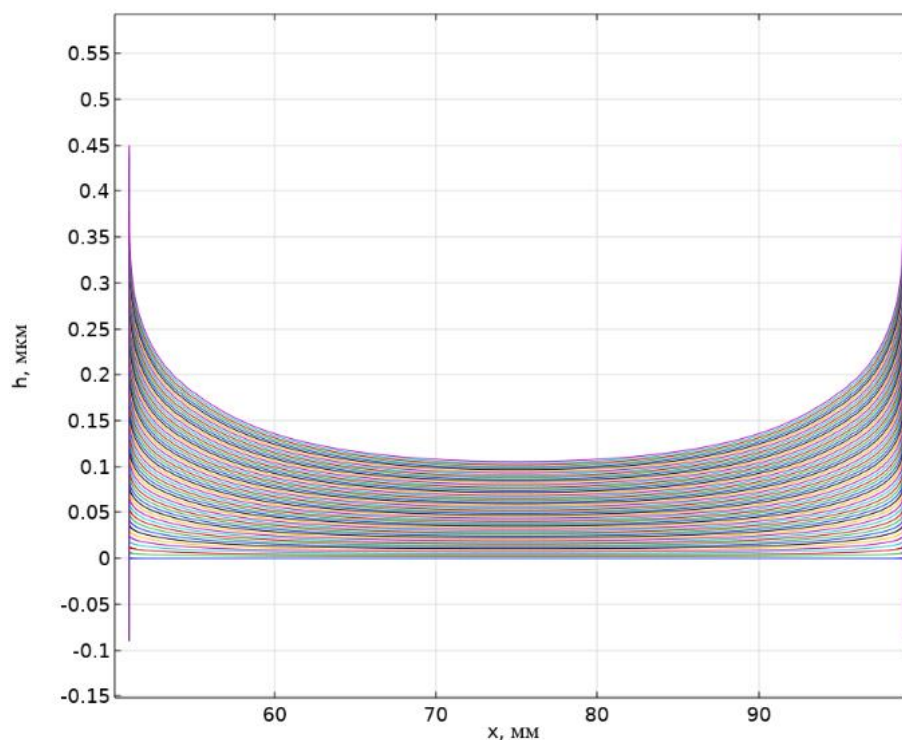


Рис. 2. Профиль осаждения олова при расстоянии 7 см

Как видно из рис. 2, толщина осаждения больше по краям образца. Это объясняется большей плотностью силовых линий электрического поля в данных областях. Данные профили были получены для диапазона расстояний от 2,5 см до 15 см. На рис. 3 представлена зависимость разброса толщины осажденной пленки  $\varepsilon$  от расстояния между электродами  $d$ .

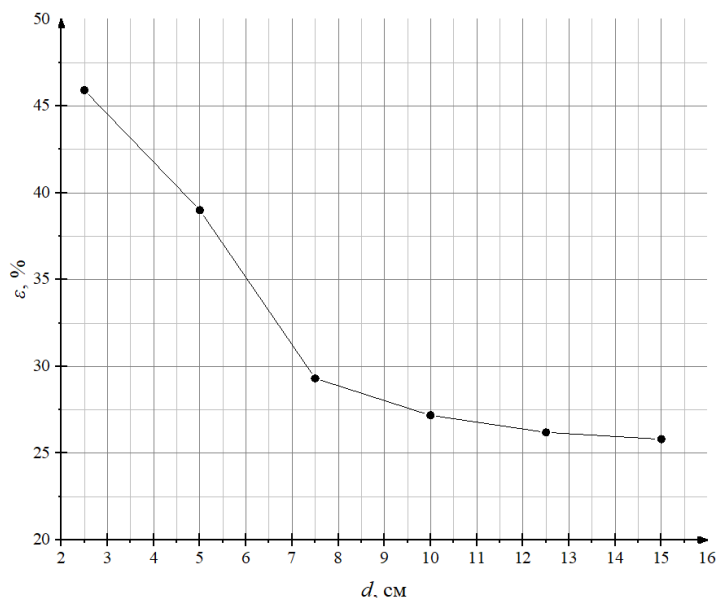


Рис.3. Зависимость разброса толщины осажденной пленки от расстояния между электродами

Из рис. 3 видно, что наибольшее улучшение в равномерности покрытия происходит до расстояния 10 см. Дальнейшее увеличение расстояния между электродами не является целесообразным.

Для осаждения золота результаты будут аналогичны с поправкой на скорость осаждения.

Таким образом, в ходе моделирования была подобрана оптимальная конструкция ванны для электрохимического осаждения и найдено оптимальное расстояние между катодом и анодом, равное  $H = 10$  см.

### Библиографический список

1. Аносов В. С., Гомзигов Д. В., Ичетовкин М. И. [и др.]. Исследование процессов пайки кремниевых кристаллов мощных транзисторов в их корпуса // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2018. Т. 20, №. 1. С. 51–59.

2. Vrublevskaya O. N. A review of developments in Au-Sn eutectic alloy electrodeposition // Innovations in Corrosion and Materials Science (Formerly Recent Patents on Corrosion Science). 2018. Vol. 8, №. 1. P. 3–23.

3. Mattsson E., Bockris J. O'M. Galvanostatic studies of the kinetics of deposition and dissolution in the copper+ copper sulphate system // Transactions of the Faraday Society. 1959. Vol. 55. P. 1586–1601.

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 10.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Е. Шестериков, Д. А. Шестерикова, 2023

УДК 539.3; 691.175.2

*И. С. Шилько<sup>1</sup>, А. П. Сазанков<sup>1</sup>, А. С. Брундуков<sup>1</sup>, Д. В. Брель<sup>1</sup>, А. А. Богданов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ МЕТОДОМ КОНТАКТНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

**Аннотация.** Исследованы деформационные характеристики термопластичных материалов на основе полиамида и полиэфирэфиркетона, применяемых в компрессорном оборудовании. Произведено сравнение методов динамического контактного индентирования и статических механических испытаний при определении модуля упругости и твердости стеклонеполненных полимерных композиционных материалов, полученных методом экструзии.

**Ключевые слова:** термопласты, полиамиды, полиэфирэфиркетоны, вязкоупругие характеристики, динамический и статический модули упругости, твердость.

### I. Введение

Высокие физико-механические характеристики современных термопластов обусловили их широкое применение на предприятиях газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Особое место среди конструкционных пластиков



занимают наполненные высокомодульными волокнами (стекло, углерод) термопласты, включая полиамиды (ПА) и весьма термостойкие полиэфирэфиркетоны (ПЭЭК), изделия из которых способны эксплуатироваться длительное время в экстремальных условиях [1–3].

Для ПА и ПЭЭК композитов, применяемых в компрессорном оборудовании, помимо теплостойкости, наиболее важными являются характеристики упругости и вязкоупругости. Анализ указанных параметров, как правило, выполняют стандартизованными статическими методами. С этой целью необходимо изготавливать специальные образцы, что затрудняет диагностику материалов непосредственно на готовых изделиях.

Эти трудности преодолеваются методами неразрушающего контроля, в частности динамического контактного индентирования (ДКИ) [4], хотя этот метод не стандартизован.

Актуальна оценка применимости метода динамического контактного индентирования для характеристики деформационных свойств полиамидов и полиэфирэфиркетонов, наполненных углеродными (УВ) и стеклянными (СВ) волокнами при нормальной температуре, что являлось целью настоящей работы.

## II. Методика, материалы и результаты исследований

Реализация метода ДКИ основана на математической обработке аналогового сигнала, полученного при ударном воздействии индентора на поверхность образца или изделия из исследуемых материалов [5].

Основным достоинством ДКИ в сравнении с методами статических испытаний является реализация неразрушающего контроля изделий до и после эксплуатации. Это позволяет оценить деградацию вязкоупругости материала после эксплуатации изделия в условиях, которые зачастую трудно воспроизвести в лабораторных условиях.

Кроме того, при получении изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) заготовки подвергают механической обработке с образованием отходов, размеры и форма которых не позволяют вырезать стандартные образцы для статических испытаний, но достаточны для анализа методом ДКИ.

В настоящей работе определение вязкоупругих параметров методом ДКИ осуществлялось прибором ИПМ–1К (РБ) и портативным цифровым твердомером ТПЦ–7 (РБ), показанными на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальное оборудование для определения параметров вязкоупругости методом ДКИ: а) прибор ИПМ–1К, б) твердомер ТПЦ–7

В перечне выходных характеристик приборов ИПМ–1К и ТПЦ–7 наибольший интерес с учетом специфики условий эксплуатации изделий из ПА и ПЭЭК композитов в компрессорном оборудовании представляют тангенс угла механических потерь  $tg\delta$ , энергия упругого деформирования  $E_e$ , энергия вязкого деформирования  $E_d$ , полная энергия деформирования  $E_{sum}$  и статический модуль упругости  $E_{st}$ .

В качестве материалов для исследований были выбраны композиты на основе ПЭЭК и нескольких марок ПА, наполненные стекловолокном (ПА46 20СВ; ПА66 30СВ, ПА66 35СВ, ПЭЭК 30СВ) и углеродным волокном (ПЭЭК 30УВ), а также ненаполненный ПЭЭК, информация о которых представлена в таблице 1.

Таблица 1

**Материалы и образцы для исследования**

Матричный материал	Наполнитель и его объемное содержание, %	Тип образца
ПА-46	СВ 20	Пластина клапана компрессора после эксплуатации
ПА-66	СВ 30	Лист ПКМ, полученный методом экструзии
	СВ 35	
ПЭЭК	0	
	СВ 30	Отходы ПКМ после механической обработки заготовок
	СВ 30	Пластина клапана компрессора до эксплуатации
	УВ 30	

Для сравнения на машине для статических механических испытаний Инстрон 5567 (Великобритания) определяли модуль упругости отдельных материалов при статическом сжатии по ГОСТ 4651-2014. Результаты испытаний представлены в виде столбчатой диаграммы на рис. 2 и в таблице 2.

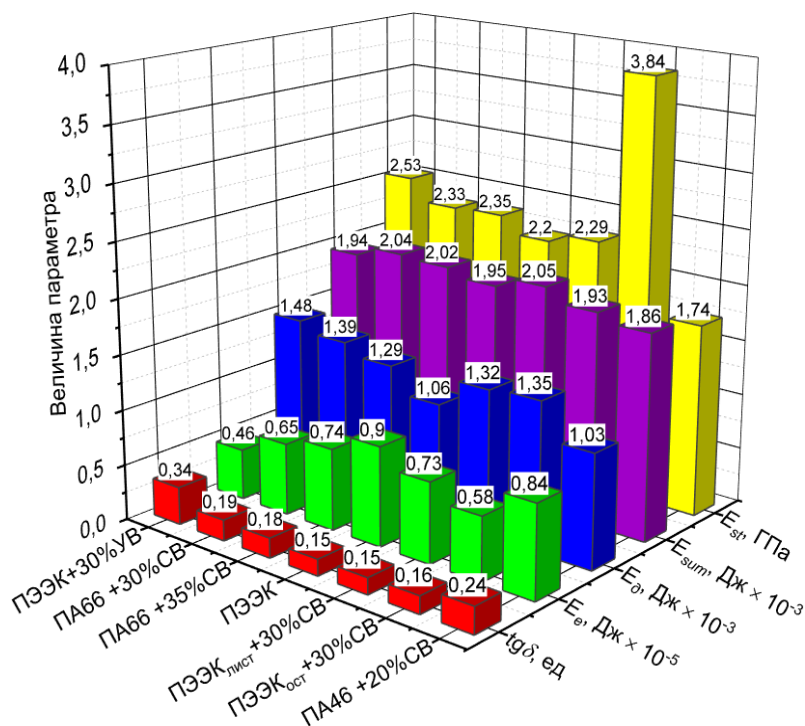


Рис. 2. Характеристики упругости и вязкоупругости термопластов, полученные методом ДКИ на приборе ИПМ–1К

Таблица 2

**Сравнение статических модулей упругости ПЭЭК и ПА композитов, определенных методами ДКИ и статических механических испытаний**

Материал		ПЭЭК <sub>лист</sub> +30%СВ	ПЭЭК	ПА-66+30%СВ
$E_{st}$ , ГПа	ДКИ	2,29	2,20	2,33
	статическое сжатие	3,83	2,66	3,11
Различие, %		40,21	17,29	25,08

Различие в модулях упругости рассматриваемых термопластов, определенных методом ДКИ и путем статических механических испытаний, варьируется от 17,29% для ненаполненного ПЭЭК до 40,21% для стеклонаполненного ПЭЭК.

В таблице 3 представлены значения твердости исследуемых термопластов. Поскольку прибор ТПЦ-7 предназначен для определения твердости конструкционных углеродистых сталей, для сопоставления твердости изучаемых полимерных материалов применялись стандартные переводные таблицы для шкалы по Шору D.

Определение твердости по Шору D статическим методом производилось на твердомере Восток-7 (РФ), оснащённом специальным штативом и механизмом нагружения, существенно повышающим точность измерения.

Таблица 3

**Сравнение твердости ПА и ПЭЭК композитов методами ДКИ и статических механических испытаний**

Твердомер Материал	ТПЦ-7		Восток 7	Различие $\Delta$ , ед. (%)
	НВ	HSD		
ПА46 + 20%СВ	312,6	44,7	82,1	37,4 (45,6)
ПА66 + 30%СВ	259,8	37,1	78,5	41,4 (52,7)
ПА66 + 35%СВ	285,0	40,7	79,5	38,8 (48,8)
ПЭЭК 100%	292,0	41,7	83,5	41,8 (50,1)
ПЭЭК <sub>лист</sub> + 30%СВ	326,0	46,6	85,8	39,2 (45,7)
ПЭЭК <sub>о</sub> + 30%СВ	282,0	40,2	86,9	46,7 (53,7)
ПЭЭК + 30%УВ	302,8	43,4	87,4	44,0 (50,3)

Для всех исследуемых материалов твердость, определенная методом ДКИ, отличается не менее чем на 45% от значений, полученных при измерении стандартизованными средствами измерений.

### III. Заключение

При сравнении упругих и вязкоупругих характеристик высоконаполненных термопластов, применяемых в компрессорном оборудовании, полученных методами ДКИ и статических испытаний при нормальной температуре, установлено, что метод ДКИ вносит существенную погрешность при определении статического модуля упругости и твердости.

Для стеклонаполненных ПА и ПЭЭК композитов различие между рассматриваемыми методами составило от 25,08 до 40,21%. В рассматриваемом случае метод ДКИ не применим для точного определения упругих характеристик высоконаполненных термопластов. Однако вопрос о корректности использования методики для установления тенденции деградации механических свойств при эксплуатации изделий из рассматриваемых ПКМ остается открытым.

Значения твердости термопластов, определенные методом ДКИ, также существенно отличаются от таковых, определенных на стандартизованном оборудовании. Максимальное

различие составило более 50% как для ненаполненного ПЭЭК, так и для стеклонеполненных ПА и ПЭЭК композитов. Таким образом, для точного определения твердости изучаемых достаточно жестких термопластов метод ДКИ, реализованный на специализированном (для конструкционных сталей или для относительно низкомолекулярных полимеров и эластомеров) оборудовании, не применим либо нуждается в развитии (уточнении моделей деформирования, используемых в программном обеспечении использованных средств измерения).

Научные руководители: к.т.н., доц., зав. лабораторией Шилько Сергей Викторович; к.т.н., ведущий научный сотрудник Гракович Петр Николаевич (Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»).

### **Библиографический список**

1. Панин С. В., Нгуен Д. А., Бочкарева С. А. [и др.]. Оптимизация состава композиций на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) с заданными трибомеханическими свойствами // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. № 3 С. 331–338.
2. Панин С. В., Нгуен Д. А., Корниенко Л. А. Антифрикционные и механические свойства термопластичных углеродных композитов на основе полиэфирэфиркетона [и др.]. // *Трение и износ*. 2020. Т.41, № 4. С. 427–435.
3. Фроленков А. С., Царенко И. В., Красюк С. И. [и др.]. Термостабильные свойства композиционных полимерных материалов антифрикционного назначения на основе полиамида // *Современные проблемы машиноведения: тез. докл. X Междунар. науч.- техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), 23–24 октября 2014 г. Гомель, 2014. С. 46.*
4. Рудницкий В. А., Крень А. П. Экспресс-оценка характеристик эластомеров методом динамического микроиндентирования // *Наука и инновации*. 2006. Т. 8., № 42. С. 25–30.
5. Сазанков, А. П., Брундуков А. С., Шилько С. В. [и др.]. Сопоставление результатов определения деформационных характеристик направленно-армированного композита методами статических механических испытаний и динамического контактного индентирования // *Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-21): материалы Регион. молодеж. науч.-практ. конф., 15 апреля 2021 г. Омск, 2021. С. 132–136.*

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 14.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© И. С. Шилько, А. П. Сазанков, А. С. Брундуков, Д. В. Брель, А. А. Богданов, 2023

*Секция*  
**Наноматериалы и нанотехнологии**

*Под редакцией О. М. Сухаревой, В. А. Егоровой*

УДК 621.793.14

*С. В. Балакирев, Д. В. Кириченко, Н. Е. Черненко, Н. А. Шандыба, М. С. Солодовник*  
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

**КАПЕЛЬНАЯ ЭПИТАКСИЯ СЕЛЕКТИВНО-ПОЗИЦИОНИРОВАННЫХ  
НАНОСТРУКТУР In/GaAs(001) С ПЕРЕМЕННЫМ РАССТОЯНИЕМ:  
ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Аннотация.** В работе представлено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование процессов роста наноструктур In/GaAs(001) методом капельной эпитаксии на структурированных поверхностях. Продемонстрированы технологические режимы, при которых достигается полная локализация наноструктур в углублениях, расположенных на переменном расстоянии друг от друга, с подавлением нежелательной нуклеации за пределами предзаданных центров.

**Ключевые слова:** капельная эпитаксия, фокусированные ионные пучки, структурированные поверхности, метод Монте-Карло.

**I. Введение**

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) в системе InGaAs/GaAs, излучающие в телекоммуникационных О- и С-диапазонах [1,2], широко исследуются и используются в современных устройствах оптоэлектроники и квантовой фотоники, что обусловлено их высоким оптическим качеством и атомоподобным энергетическим спектром [3]. Эффективность устройств на основе КТ определяется их геометрическими параметрами, такими как поверхностная плотность, размер и форма. Однако в последнее время все более важное значение приобретают не только усредненные характеристики КТ, но и их пространственное расположение на поверхности. Например, создание упорядоченного массива углублений с контролируемыми параметрами позволяет задавать предпочтительные центры зарождения КТ, а также их геометрические характеристики. Такой подход позволяет упростить процесс последующей пост-обработки с извлечением одиночных КТ и обеспечить большой выход годных изделий на их основе, таких как источники одиночных и запутанных фотонов.

Регулярные массивы КТ InAs с околоединичной селективностью формирования были получены с помощью эпитаксиального роста на подложках GaAs, структурированных различными методиками, такими как локальное анодное окисление [4], травление фокусированными ионными пучками (ФИП) [5], наноимпринтная [6] и электронно-лучевая литография [7] и др. Однако не менее важным является селективное позиционирование КТ с переменным расстоянием друг от друга. Например, лазеры на модах шепчущей галереи требуют плотного расположения КТ вдоль внешнего кольца циркулярного микрорезонатора [8]. При этом, так как моды шепчущей галереи локализованы по периметру резонатора, КТ во внутренней области должны отсутствовать во избежание увеличения порогового тока и фонового спонтанного излучения [8]. Еще одна сфера применения нерегулярных массивов КТ включает схемы обработки квантовой информации, в которых должно осуществляться точное управление взаимодействием между спинами дистанцированных КТ [9], а также так

называемые квантово-точечные молекулы, представляющие как фундаментальный [10], так и практический интерес с точки зрения их возможного применения в устройствах нанoeлектроники и квантовых вычислений [11]. Однако для получения КТ, расположенных одновременно на малом и большом расстоянии друг от друга, необходимо достижение высокой степени селективности роста по отношению к предзаданным центрам с исключением нуклеации за их пределами.

## II. Постановка задачи

В данной работе проводится комплексное экспериментальное и теоретическое исследование роста наноструктур In/GaAs(001) на ФИП-структурированных поверхностях методом капельной эпитаксии, заключающимся в поочередном осаждении компонент III (In) и V (As) группы, приводящем к формированию металлических капель на первом этапе и их дальнейшей трансформации в КТ InAs на последнем этапе.

## III. Описание эксперимента

Для проведения текущих экспериментальных исследований использовались подложки GaAs(001), структурированные методом ФИП в растровом электронном микроскопе (РЭМ) Nova Nanolab 600 с источников ионов Ga<sup>+</sup>. Были сформированы два типа массивов площадью 5×5 мкм<sup>2</sup> с точками воздействия ФИП, расположенными на расстояниях 0,5 и 1 мкм. Далее образцы со структурированными поверхностями помещались в установку молекулярно-лучевой эпитаксии SemiTEq STE35, где проводился стандартный сгон окисла и рост буферного слоя GaAs при температуре 580 °С. Затем поток мышьяка перекрывался с целью снижения фонового давления в камере роста до ~1·10<sup>7</sup> Па. Далее на поверхность подложки с номинальной скоростью 0,05 и 0,25 монослоя (МС) в секунду осаждались атомы In в количестве 3 эквивалентных МС. Температура подложки в процессе осаждения изменялась от 250 °С до 350 °С. После формирования капель образцы охлаждались и помещались в камеру РЭМ для измерения геометрических параметров.

## IV. Результаты экспериментов

На первом этапе были проанализированы параметры массивов наноструктур In/GaAs(001), сформированных при различной температуре подложки на плоской поверхности. Установлено, что повышение температуры от 250 °С до 350 °С приводит к уменьшению поверхностной плотности капель, оцениваемой как их количество на РЭМ-изображении к площади сканирования, с 3,1·10<sup>8</sup> до 2,4·10<sup>7</sup> см<sup>-2</sup>, что соответствует среднему расстоянию между каплями, соответственно, 0,57, 1,26 и 2,04 мкм. РЭМ-изображения образцов, полученных после заравнивания ФИП-модифицированной поверхности буферным слоем GaAs и последующего роста методом капельной эпитаксии, показаны на рис. 1.

Из представленных изображений следует, что полученные углубления являются предпочтительными центрами зарождения и последующего роста в них капель In, о чем свидетельствует отсутствие наноструктур за пределами участков модификации, кроме случая роста на поверхности с углублениями, расположенными на расстоянии 1 мкм друг от друга, при 250 °С (рис. 1в). Однако при этом следует отметить, что материал капель не распределяется равномерно между всеми углублениями в случаях, когда атомы обладают повышенной диффузионной длиной, что характерно для роста при повышенных температурах. Данная закономерность связана с наличием критического размера устойчивого островка, ниже которого значительно возрастает вероятность его распада.

При формировании капель при температуре 300 °С на поверхности с участками модификации, расположенными через 0,5 мкм, с меньшим количеством проходов ионного пучка обнаружено селективное формирование капель почти в каждом углублении по периметру массива с отсутствием зарождения во внутренней области (рис. 2а), что позволяет

сделать вывод о возможности локализации наноструктур в массиве с переменным расстоянием между центрами нуклеации в диапазоне от 0,5 до 3 мкм.

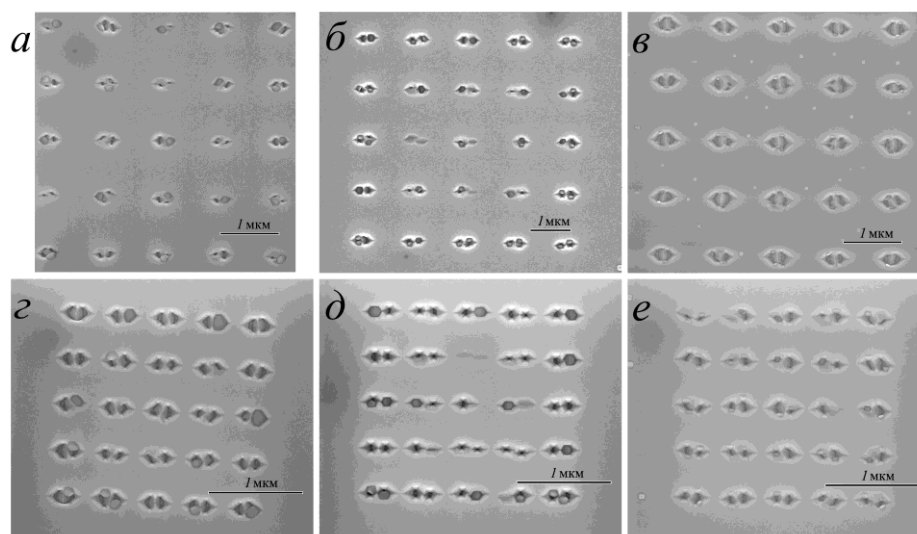


Рис. 1. РЭМ-изображения массивов капель, полученных на ФИП-структурированных поверхностях с расстоянием между точками воздействия 1 мкм (а-в) и 0,5 мкм (г-е) при различных температурах осаждения: 350 °С (а, г), 300 °С (б, д) и 250 °С (в, е)

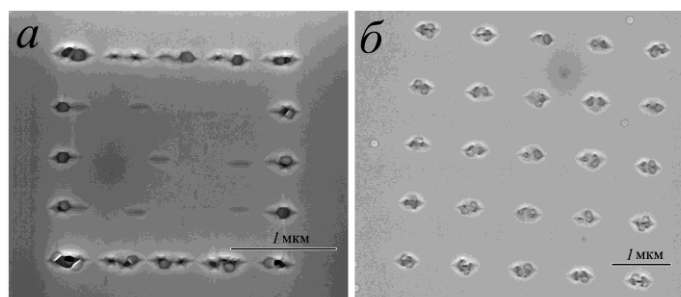


Рис. 2. РЭМ-изображения массивов капель, полученных на ФИП-структурированных поверхностях с расстоянием между точками воздействия 0,5 мкм (а) и 1 мкм (б) при различных скоростях осаждения In: 0,05 МС/с (а) и 0,25 МС/с (б)

Также в результате проведенного исследования обнаружена возможность создания массивов пар капель In с близкой к единице степенью заполнения углублений, расположенных на расстоянии 1 мкм (рис. 2б). Данная конфигурация, полученная при температуре 300 °С со скоростью осаждения, увеличенной до 0,25 МС/с, демонстрирует также практически полное отсутствие нежелательного зарожения за пределами участков модификации.

## V. Моделирование

Теоретические исследования процессов формирования наноструктур In/GaAs(001) методом капельной эпитаксии на структурированных поверхностях проводились с помощью разработанной нами ранее математической модели, основанной на комбинации аналитических выражений классической теории нуклеации и кинетического метода Монте-Карло [12, 13]. Модель имеет размерность 1+1, имитирующую рассматриваемую систему материалов в разрезе. Универсальные принципы взаимодействия атомов, заданные в модели, позволяют учитывать структурные неоднородности поверхности различной формы и размеров. В данной работе в качестве участков модификации были заданы углубления

треугольной формы с гранями ориентации (111), аналогичные наблюдаемым экспериментально пирамидальным углублениям при их рассмотрении в профиль.

Анализ проведенных теоретических исследований показал, что снижение температуры подложки с 350 °С до 250 °С, как и в случае с экспериментальными результатами, приводит к значительному уменьшению диффузионной длины адатомов In и соответствующему увеличению поверхностной плотности островков. На рис. 3а продемонстрирована типичная модельная морфология системы с каплями In/GaAs, сформированными при температуре 300 °С на поверхности с парами углублений диаметром 100 нм, расположенными на расстоянии 500 нм друг от друга. На рис. 3б представлена морфология капель, полученных на аналогичной поверхности при тех же условиях роста.

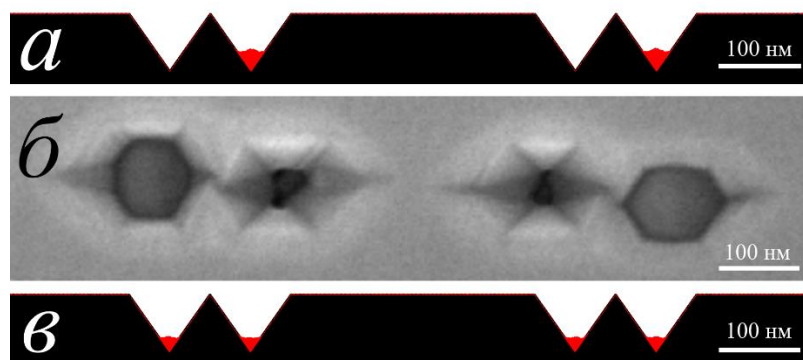


Рис. 3. Морфология массивов капель In, полученных на структурированной поверхности при температуре 300 °С: а) моделирование, б) РЭМ-изображение, и температуре 200 °С: в) моделирование

В диапазоне температур 250–350 °С в каждом из вычислительных экспериментов наблюдаются углубления, в которых отсутствует капля, что связано как с низкой вероятностью формирования критических кластеров, так и с высокой вероятностью их распада под действием высокой температуры подложки. Однако снижение температуры до 200 °С, как видно на рис. 3в, приводит к достижению 100%-го заполнения углублений с отсутствием капель за их пределами.

Для оценки возможности селективного формирования капель на структурированных поверхностях с углублениями, расположенными на различных расстояниях друг от друга, было проведено моделирование процессов капельной эпитаксии In/GaAs на поверхности с углублениями меньшего размера (20 нм). На рис. 4 показана морфология массивов капель, сформированных на поверхностях с переменным структурированием.



Рис. 4. Морфология массивов капель In, полученных на структурированной поверхности в результате моделирования при различных температурах: а) 250 °С, б) 200 °С, в) 150 °С

При температуре 250 °С поверхностная плотность углублений при моделировании на плоской поверхности составляет  $4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , что соответствует среднему расстоянию между углублениями 500 нм. Несмотря на то, что такой диффузионной длины адатомов достаточно для минимизации зарождения за пределами углублений, расположенных на сопоставимом или меньшем расстоянии друг от друга, температура слишком высока для заполнения каплями всех углублений, в том числе расположенных близко друг к другу (рис. 4а).



Снижение температуры до 200 °С позволяет обеспечить 100%-ную селективность, выраженную как отношение числа капель, расположенных в углублениях, к суммарному числу капель и углублений, деленному на два (рис. 4б). Дальнейшее уменьшение температуры до 150 °С приводит к нежелательной нуклеации за пределами углублений, что обусловлено снижением интенсивности поверхностной диффузии и повышением вероятности нуклеации (рис. 4в).

## VI. Заключение

Таким образом, установлено, что углубления, сформированные после заращивания слоем GaAs ФИП-структурированных поверхностей, являются предпочтительными центрами зарождения капель In при любой температуре в диапазоне от 250 °С до 350 °С. Однако при повышенных температурах степень заполнения углублений снижается, что связано с увеличением вероятности распада островков докритического размера. С помощью моделирования методом Монте-Карло установлены технологические режимы, при которых возможно достижение 100%-ной локализации капель In на структурированной поверхности с углублениями, расположенными друг от друга на переменном расстоянии в диапазоне от 20 до 340 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00310, <https://rscf.ru/project/21-79-00310/>, в Южном федеральном университете.

## Библиографический список

1. Nawrath C., Vural H., Fischer J. [et al.]. Resonance fluorescence of single In(Ga)As quantum dots emitting in the telecom C-band // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, no. 24. P. 244002.
2. Höfer B., Olbrich F., Kettler J. [et al.]. Tuning emission energy and fine structure splitting in quantum dots emitting in the telecom O-band // *AIP Adv.* 2019. Vol. 9, no. 8. P. 085112.
3. Riedl T., Kunnathully V. S., Trapp A. [et al.]. Size-Dependent Strain Relaxation in InAs Quantum Dots on Top of GaAs(111)A Nanopillars // *Adv. Mater. Interfaces.* 2022. Vol. 9. P. 2102159.
4. Martín-Sánchez J., Muñoz-Matutano G., Herranz J. [et al.]. Single Photon Emission from Site-Controlled InAs Quantum Dots Grown on GaAs(001) Patterned Substrates // *ACS Nano.* 2009. Vol. 3, no. 6. P. 1513–1517.
5. Zhang H., Walther T. Controlled Quantum Dot Formation on Focused Ion Beam-Patterned GaAs Substrates // *FIB Nanostructures.* Zurich, 2013. P. 299–314.
6. Schramm A., Tomilla J., Strelow C. [et al.]. Large array of single, site-controlled InAs quantum dots fabricated by UV-nanoimprint lithography and molecular beam epitaxy // *Nanotechnology.* 2012. Vol. 23, № 17. P. 175701.
7. Atkinson P., Kiravittaya S., Benyoucef M. [et al.]. Site-controlled growth and luminescence of InAs quantum dots using in situ Ga-assisted deoxidation of patterned substrates // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93, no. 10. P. 101908.
8. Wang D., Zhu T., Oliver R. A. [et al.]. Ultra-low-threshold InGaN/GaN quantum dot micro-ring lasers // *Opt. Lett.* 2018. Vol. 43, no. 4. P. 799.
9. Imamoglu A., Awschalom D. D., Burkard G. [et al.]. Quantum Information Processing Using Quantum Dot Spins and Cavity QED // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 83, no. 20. P. 4204–4207.
10. Koley S., Cui J., Panfil Y. E. [et al.]. Coupled Colloidal Quantum Dot Molecules // *Acc. Chem. Res.* 2021. Vol. 54, no. 5. P. 1178–1188.
11. Heyn C., Küster A., Gräfenstein A. [et al.]. GaAs quantum dot molecules filled into droplet etched nanoholes // *J. Cryst. Growth.* 2017. Vol. 477, no. 1. P. 235–238.
12. Balakirev S. V., Solodovnik M. S., Ageev O. A. Hybrid Analytical-Monte Carlo Model of In/GaAs(001) Droplet Epitaxy: Theory and Experiment // *Phys. Status Solidi B.* 2018. Vol. 255, no. 4. P. 1700360.

13. Balakirev S. V., Solodovnik M. S., Eremenko M. M. [et al.]. Mechanism of nucleation and critical layer formation during In/GaAs droplet epitaxy // Nanotechnology. 2019. Vol. 30. P. 505601.

*Дата поступления статьи: 03.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 13.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© С. В. Балакирев, Д. В. Кириченко, Н. Е. Черненко, Н. А. Шандыба, М. С. Солодовник, 2023

УДК 538.9

*А. В. Балахнин*

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ГРАФЕН/MoS<sub>2</sub>

**Аннотация.** В работе в рамках теории функционала плотности с использованием подхода псевдопотенциалов в пакете Quantum Espresso исследуются электронные и оптические свойства гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub>. Рассчитаны зонная структура и действительная и мнимая части комплексной диэлектрической функции. Электронная структура и оптические свойства гетероструктуры отличаются от однослойного графена и MoS<sub>2</sub>, что расширяет масштабы применения двумерных материалов.

**Ключевые слова:** гетероструктура graphene/MoS<sub>2</sub>, оптические свойства, ab initio, quantum espresso.

### I. Введение

Успешное отделение графена сильно стимулировало интерес к исследованию двумерных материалов, и благодаря своим замечательным физическим и химическим свойствам графен нашел широкое применение в разработке электронных устройств [1].

Однако отсутствие запрещенной зоны у графена ограничивает его применение в электронике, что приводит к появлению других 2D-материалов с гексагональной структурой, например, черного фосфора, нитрида бора [2–4].

Одним из методов, используемых для расширения области применения графена, является формирование многослойной структуры или гетероструктуры. Объединяя различные двумерные материалы вместе, можно создавать двухслойные или даже многослойные искусственные материалы, которые поддерживаются ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями. Такие материалы известны как гетеропереходы Ван-дер-Ваальса. Удивительные физические свойства можно получить, сложив вместе двумерные материалы с разными свойствами. Эти уникальные физические и химические свойства делают гетеропереход Ван-дер-Ваальса даже более важным, чем сам двумерный материал [5, 6]. Большая площадь поверхности, высокая химическая стойкость, высокая стабильность и хорошая электропроводность графена свидетельствуют о том, что монослои графена перспективны в качестве подложек для улучшения электрохимических и электрокаталитических свойств оксидов и сульфидов металлов.

Монослои MoS<sub>2</sub> обладают многими превосходными свойствами, такими как высокая подвижность электронов, низкая размерность, гладкий атомарный лист и выдающиеся механические свойства. Монослои MoS<sub>2</sub> были широко исследованы [7, 8] и успешно

получены благодаря их исключительным свойствам. Кроме того, гетероструктура графен/MoS<sub>2</sub> открывает возможности для многих приложений. В работе [9] проведены систематические исследования электронных и магнитных свойств совершенных, легированных вакансиями и адсорбированных неметаллическими элементами (H, B, C, N, O и F) монослоев MoSe<sub>2</sub>, MoTe<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> с помощью расчетов из первых принципов.

В 2011 году Чанг и соавторы [10, 11] успешно синтезировали композиты слоистого графена или графеновый нанолит/MoS<sub>2</sub> методом растворной фазы с L-цистеином, и полученные композиты продемонстрировали трехмерную архитектуру и отличные электрохимические характеристики, а также они могут выступать в качестве анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов.

Исследования оптических свойств гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub> до сих пор отсутствуют. Гетерогенная структура графена имеет блестящие перспективы для приложений, а электронная структура MoS<sub>2</sub> с прямой запрещенной зоной является важным свойством для многих оптических приложений. В этой статье мы исследуем оптические свойства графен/MoS<sub>2</sub> на основе расчетов функционала плотности.

## II. Методика расчета

Все расчеты выполнены в рамках теории функционала плотности (DFT) с использованием подхода псевдопотенциалов в пакете Quantum Espresso [12–14]. Для формирования вертикальной гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub>, которая показана на рис. 1, мы уложили монослой MoS<sub>2</sub> и монослой графена. Постоянная решетки монослоя чистого графена составляет 2,47 Å, а MoS<sub>2</sub> – 3,26 Å. Размер суперъчейки монослоя графена равен  $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$ , а монослоя MoS<sub>2</sub> –  $2 \times 2$ . При данном наложении удалось получить несоответствие решеток около 2,30%. Описание взаимодействия между электронами и ионами в Quantum Espresso реализовано методом псевдопотенциалов, который позволяет за счет сглаживания быстро осциллирующих волновых функций электронов вблизи атомных ядер повысить эффективность расчетов. В настоящих расчетах использован метод спроецированных плоских волн (PAW-потенциал). Обменное корреляционное взаимодействие электронов учитывалось при помощи приближения обобщенных градиентов (GGA-PBE). Плоские волны базисного набора отделялись энергией отсечки 500 eV. Процедура оптимизации энергии системы была произведена с помощью алгоритма Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шенно (BFGS) до достижения сходимости по энергии  $10^{-4}$  эВ. Для оптимизации элементарных ячеек был выбран метод разбиения обратного k-пространства сеткой с размером  $7 \times 7 \times 1$ . Во избежание эффектов, связанных с конечными размерами моделируемой системы, использованы периодические граничные условия.

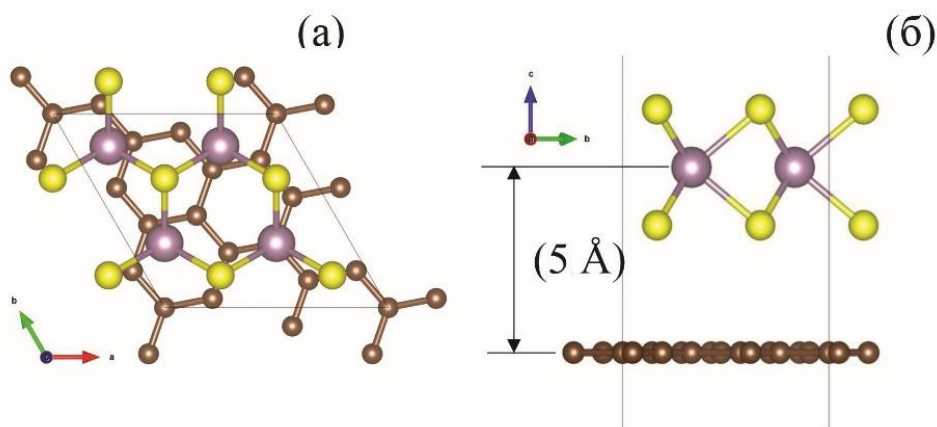


Рис. 1. Вид сверху (а) и сбоку (б) гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub>. Фиолетовым, желтым и серым цветом обозначены атомы Mo, S и C соответственно

### III. Обсуждение результатов

Для иллюстрации сходства и различия монослоев графена, дисульфида молибдена и монослоя гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub> мы рассчитали электронные структуры этих систем. Структуры энергетических зон для этих систем показаны на рис. 2. Полученные нами расчетные кривые хорошо согласуются с результатами предыдущих расчетов [15]. На рис. 2 отчетливо видно, что графен — это материал с шириной запрещенной зоны, равной нулю, а MoS<sub>2</sub> — материал с шириной запрещенной зоны 1,73 эВ. После их объединения в гетероструктуру графен/MoS<sub>2</sub> ширина запрещенной зоны составляет 0,004 эВ, что детальнее видно на встроенном рис. 2в. За счет изменения внутренней энергии атомов в слое графена в результате взаимодействия слоев графена и дисульфида молибдена происходит открытие запрещенной зоны [16].

Смещение точки Дирака в графене относительно уровня Ферми вверх указывает на перенос заряда между слоями графена и MoS<sub>2</sub>. Из рис. 2 видно, что электронная структура сильно меняется после формирования гетероструктуры. Поэтому мы предполагаем, что это также повлияет на оптические свойства гетероструктуры.

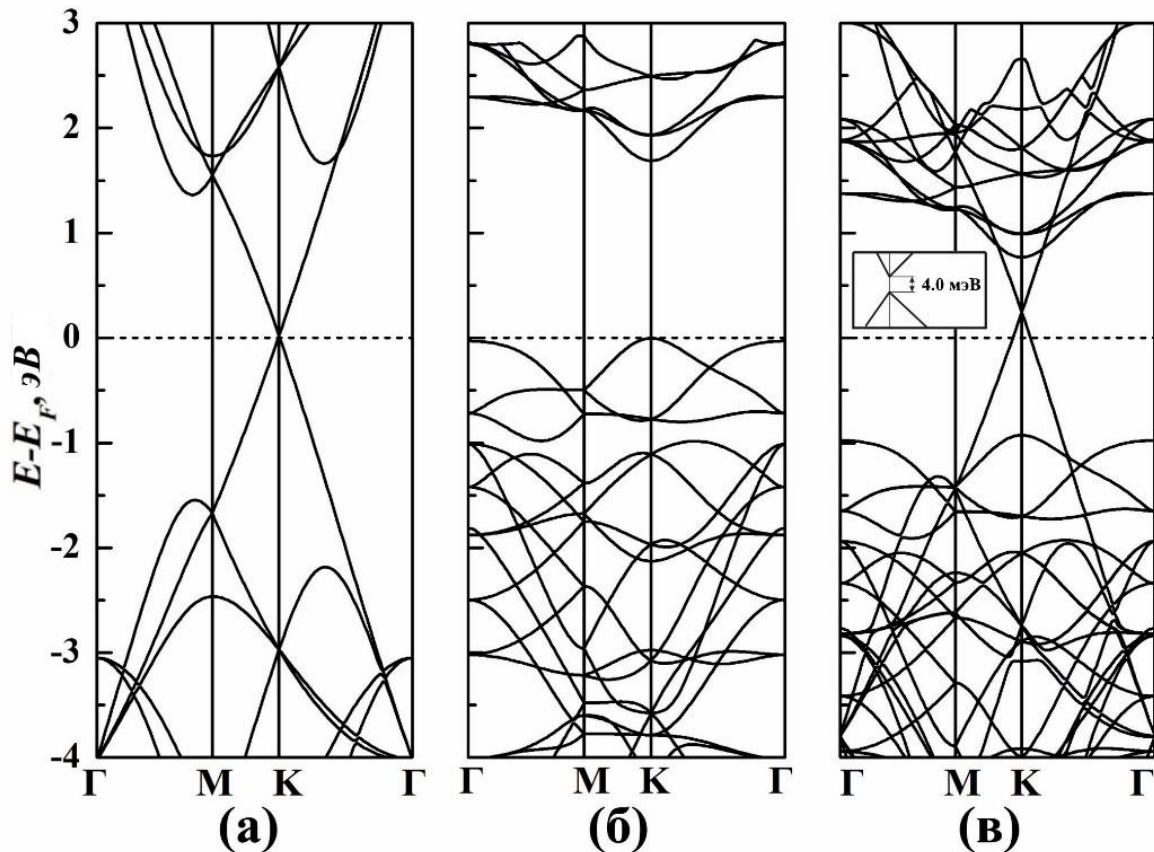


Рис. 2. Зонная структура графена (а), MoS<sub>2</sub> (б) и гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub> (в)

Оптические свойства любого материала могут быть определены через его диэлектрическую проницаемость. Для моделирования комплексной диэлектрической функции гетероструктуры  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega)$ , которая является функцией энергии фотона, мы используем суперпозицию осцилляторов Лоренца. Диэлектрическая проницаемость, вообще говоря, представляет собой действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1(\omega)$ . Эта часть диэлектрической проницаемости связана с различными видами поляризации смещения внутри материала и при помещении материала во внешнее электрическое поле дает нам информацию о запасенной в нем энергии. Мнимая

часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2(\omega)$  связана с потерями энергии в материале.

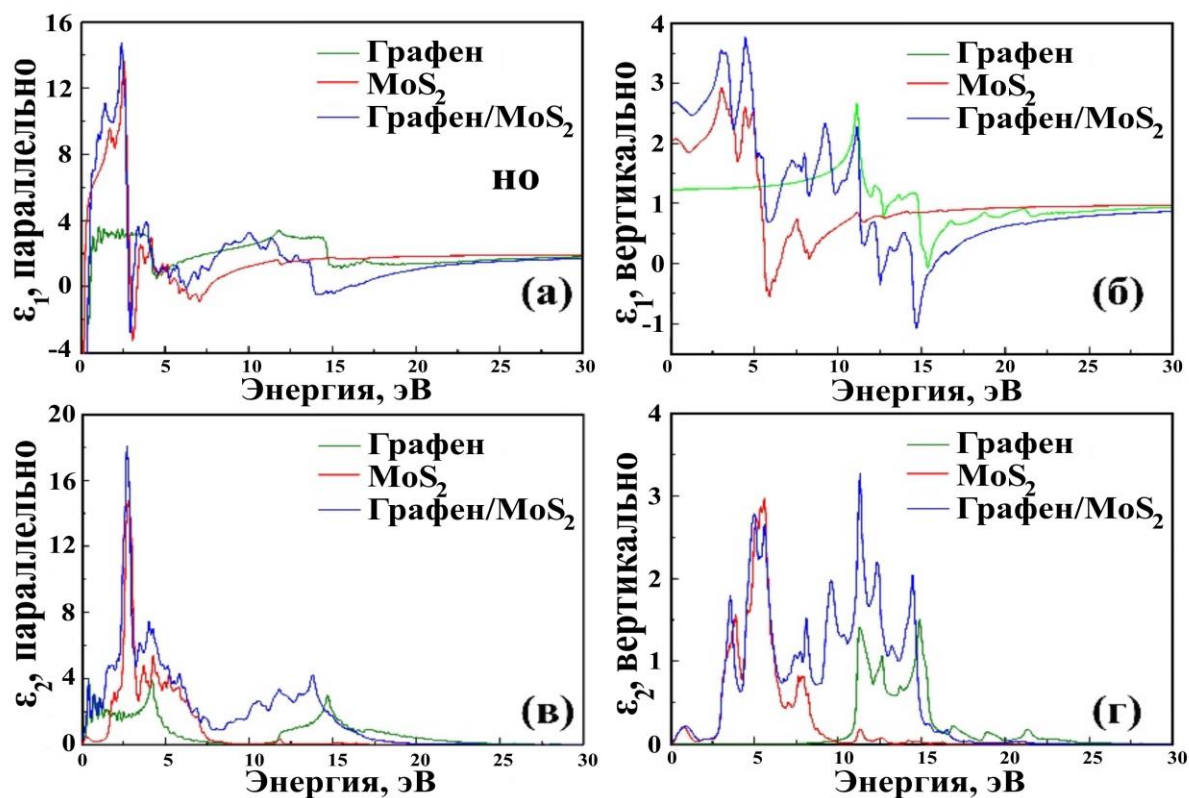


Рис.3. Параллельная (а), вертикальная (б) составляющие действительной части и параллельная (в), вертикальная (г) составляющие мнимой части диэлектрической проницаемости использованных систем

На рис. 3 показаны рассчитанные диэлектрические проницаемости  $\varepsilon$  монослоев  $\text{MoS}_2$  ( $\text{MoS}_2$ ), графена (Graphene) и гетероструктуры графен/ $\text{MoS}_2$  (Graphene/ $\text{MoS}_2$ ). На рис. 3а показана параллельная составляющая  $\varepsilon_1(\omega)$ . На самом деле исследователей больше интересуют изменения, происходящие в области видимого света. Как можно заметить, в области видимого света значение  $\varepsilon(\omega)$  больше всего в системе графен/ $\text{MoS}_2$ , потом система  $\text{MoS}_2$  и система графена. Сравнивая системы графен/ $\text{MoS}_2$  и графен в низкоэнергетической зоне, можно обнаружить, что значения параллельного направления  $\varepsilon(\omega)$  для двух систем изменяются. Это связано с тем, что система графен/ $\text{MoS}_2$  является анизотропным материалом, а параллельное направление  $\varepsilon(\omega)$  иллюстрирует различия в вертикальном и горизонтальном направлениях. На рис. 3в, 3г показаны параллельное и вертикальное направления мнимой части диэлектрической проницаемости, соответственно. Те же отношения могут быть найдены между параллельной и вертикальной составляющими  $\varepsilon_2(\omega)$ .

#### IV. Выводы и заключение

В этой статье мы исследовали электронную структуру и оптические свойства гетероструктуры графен/ $\text{MoS}_2$ , исходя из первых принципов. На основе теории функционала плотности рассчитаны зонная структура и оптические свойства монослоев графена, дисульфида молибдена и монослоя гетероструктуры графен/ $\text{MoS}_2$ . Обнаружено, что из-за межслойного взаимодействия происходит перенос заряда от слоя графена к слою  $\text{MoS}_2$ , который приводит к смещению точки Дирака в графене относительно уровня Ферми, а также изменению внутренней энергии атомов в слое графена, за счет чего открывается запрещенная зона.

Формирование гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub> повлияло и на оптические свойства по сравнению с однослойными графеном и дисульфидом молибдена. Приведенные выше результаты показывают, что благодаря формированию гетероперехода оптические свойства гетероструктуры графен/MoS<sub>2</sub> претерпевают изменения по сравнению с одиночными слоями, что расширяет возможности использования двумерных материалов в оптических приложениях.

Научный руководитель Шарин Егор Петрович, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

#### Библиографический список

1. Zhu H., Zhao L., Liu J. [et al.]. Monolayer graphene saturable absorber with sandwich structure for ultrafast solid-state laser // *Opt. Laser. Technol.* 2015. Vol. 55. P. 081304.
2. Ahmed S., Ding X., Bao N. [et al.]. Inducing high coercivity in MoS<sub>2</sub> nanosheets by transition element doping // *Chem. Mater.* 2017. Vol. 29. P. 9066–9074.
3. Deng S., Zhong Y., Zeng Y. [et al.]. Directional construction of vertical nitrogen-doped 1T-2H MoSe<sub>2</sub>/graphene shell/core nanoflake arrays for efficient hydrogen evolution reaction // *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29. P. 1700748.
4. Chen Y., Gan L., Li H. [et al.]. Achieving uniform monolayer transition metal dichalcogenides film on silicon wafer via silanization treatment: A typical study on WS<sub>2</sub>. // *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29. P. 1603550.
5. Frisenda R., Navarro-Moratalla E., Gant P. [et al.]. Recent progress in the assembly of nanodevices and van der Waals heterostructures by deterministic placement of 2D materials // *Chem. Soc. Rev.* 2018. Vol. 47. P. 53–68.
6. Frisenda R., Molina-Mendoza A. J., Mueller T. [et al.]. Atomically thin p-n junctions based on two-dimensional materials // *Chem. Soc. Rev.* 2018. Vol. 47. P. 3339–3358.
7. Ma D., Ju W., Li T. [et al.]. Modulating electronic, magnetic and chemical properties of MoS<sub>2</sub> monolayer sheets by substitutional doping with transition metals // *Appl. Surf. Sci.* 2016. Vol. 364. P. 181–189.
8. Ma D., Ju W., Li T. [et al.]. The adsorption of CO and NO on the MoS<sub>2</sub> monolayer doped with Au, Pt, Pd, or Ni: A first-principles study // *Appl. Surf. Sci.* 2016. Vol. 383. P. 98–105.
9. Ma Y., Dai Y., Guo M. [et al.]. Electronic and magnetic properties of perfect, vacancy-doped, and nonmetal adsorbed MoSe<sub>2</sub>, MoTe<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> monolayers // *Phys. Chem.* 2011. Vol. 13. P. 15546–15553.
10. Chang K., Chen W. In situ synthesis of MoS<sub>2</sub>/graphene nanosheet composites with extraordinarily high electrochemical performance for lithium ion batteries // *Chem. Commun.* 2011. Vol. 47. P. 4252–4254.
11. Chang K., Chen W. L-Cysteine-Assisted Synthesis of Layered MoS<sub>2</sub>/Graphene Composites with Excellent Electrochemical Performances for Lithium Ion Batteries // *ACS Nano* 2011. Vol. 5. P. 4720.
12. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N. [et al.]. Quantum ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials // *J. Phys.:Condens. Matter.* 2009. Vol. 21. P. 399502.
13. Giannozzi P., Andreussi O., Brumme T. [et al.]. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO // *J. Phys.:Condens. Matter.* 2017. Vol. 29. P. 465901.
14. Giannozzi P., Baseggio O., Bonfa P. [et al.]. Quantum ESPRESSO toward the exascale // *J. Chem. Phys.* 2020. Vol. 152. P. 154105.
15. Phuc H. V., Hieu N. N., Hoi B. D. [et al.]. First principle study on the electronic properties and Schottky contact of graphene adsorbed on MoS<sub>2</sub> monolayer under applied out-plane strain // *Surf. Sci.* 2018. Vol. 668. P. 23–28.



16. Ghorbani-Asl M., Bristowe P. D., Koziol K. [et al.]. Effect of compression on the electronic, optical and transport properties of MoS<sub>2</sub>/graphene-based junctions // *2D Mater.* **2016.** Vol. 3. P. 025018.

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 28.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. В. Балахнин, 2023

УДК 621.762.8 : 621.787.6

*Т. М. Гомонюк*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ ГИБРИДНОГО АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОТОТИПОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

**Аннотация.** Широкое применение аустенитных нержавеющей сталей в традиционных и нетрадиционных технологиях производства обуславливает необходимость внедрения научно-обоснованных подходов к постобработке поверхности, которое в последнее время эффективно реализуется сочетанием аддитивного производства с ультразвуковым нанокристаллическим поверхностным модифицированием. В работе представлен аналитический обзор количества публикаций по проблеме гибридного аддитивно-субтрактивного производства прототипов изделий из аустенитных нержавеющей сталей.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, гибридное аддитивно-субтрактивное производство, аустенитные нержавеющей стали, интенсивное поверхностное пластическое деформирование, ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование, ультразвуковая упрочняющая обработка.

### **I. Введение**

Аддитивное производство (АП) – это интенсивно развивающаяся технология изготовления деталей сложной, зачастую уникальной формы посредством послойного выращивания, используемая во многих отраслях промышленности с начала 80-х годов 20-го века [1]. Детали, изготовленные методом АП, используются в авиационной (топливные форсунки, крыльчатки) промышленности, в машиностроении (пуансоны, штампы, формы для литья), а также медицине (зубные имплантаты) [2]. В качестве сырья в АП используются металлы и сплавы (алюминий, нержавеющей стали, титан, кобальтохромовые сплавы, никелевые сплавы, драгоценные металлы), а также полимерные и керамические материалы [3]. Среди вышеназванных конструкционных материалов широкое применение в АП получили аустенитные нержавеющей стали (АНС) благодаря высоким механическим и эксплуатационным характеристикам: пластичности, стойкости к охрупчиванию и к межкристаллитной коррозии, жаропрочности и жаростойкости в условиях эксплуатации при повышенных температурах [3]. Изделия из АНС преимущественно используются в аэрокосмической промышленности, медицине, автомобилестроении, нефтегазовой отрасли и судостроении [2].

В зависимости от типа энергетического воздействия технологии АП подразделяются на дуговые (проволочное электродуговое выращивание [4]) и лучевые (порошковое и проволочное спекание, сплавление, сварка и наплавка лазерным [5, 6] и электронным [7, 8] пучком). В АП преимущественно используются следующие методы формирования слоя: направленное энергетическое осаждение и плавление в порошковом слое [9].

Несмотря на очевидные преимущества (себестоимость, производительность, возможность печати изделий сложной формы) АП, его применение сопряжено с образованием технологических дефектов, способствующих снижению физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик деталей и заготовок из АНС при их 3D-печати [1]. К таким недостаткам аддитивного производства относятся несплавления, газовая пористость, высокая шероховатость поверхности [10], микротрещины, остаточные напряжения, побочные фазы [11], крупнозернистая неравновесная структура [12]; необходимость устранения или минимизации этих недостатков обуславливает актуальность разработки гибридных методов АП, сочетающих 3D-печать и постобработку посредством их интеграции на одном производственном этапе [13].

## **II. Постановка задачи**

Для оптимизации временных, материальных и энергетических затрат на аддитивное производство АНС в последнее десятилетие происходит интенсивное развитие научно-практических подходов к комбинированию методов 3D-печати и постобработки поверхности. Помимо варьирования режимов печати, выполняется выбор одного из следующих способов постобработки: термическая (горячее изостатическое прессование [14], плазменное азотирование), химическая (травление и электрополирование) или механическая (шлифование и полирование, дробеструйное и ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование [14] и т.д.) обработка.

Как свидетельствует поисковый литературный обзор, для повышения функциональных характеристик изделий из АНС перспективным является использование гибридных методов производства, в частности, комбинирование АП с методами интенсивного поверхностного пластического деформирования (ИППД) [15], в том числе с ультразвуковым нанокристаллическим поверхностным модифицированием (УНПМ), полным аналогом которого является метод ультразвуковой упрочняющей обработки (УУО) [16].

Таким образом, в данной работе представлены результаты аналитического обзора количества публикаций по проблеме гибридного аддитивно-субтрактивного производства (ГАСП) прототипов изделий из аустенитных нержавеющей сталей методом 3D-печати, в том числе с их последующей ультразвуковой упрочняющей обработкой в одном производственном цикле.

## **III. Материалы и методы**

Количественный анализ научных трудов по проблеме гибридного аддитивно-субтрактивного производства прототипов изделий из АНС методом АП с их последующей УУО выполнялся с использованием поисковой системы «ScienceDirect» группы компаний Elsevier (Эльзевир), ежегодно публикующей порядка четвертой части от всех издаваемых в мире научных журналов. База данных ScienceDirect содержит более 19 миллионов публикаций (1,4 миллиона находятся в открытом доступе), к числу которых относятся монографии, научные статьи и материалы конференций, представленные более чем в 2800 рецензируемых журналах в области физических, инженерных, естественных, а также медицинских, общественных и гуманитарных наук.

Аналитический обзор публикаций по проблеме АП прототипов изделий из АНС с их последующей УУО выполнялся по состоянию на 1 марта 2023 года с использованием



поисковых запросов, выделенных в четыре логически взаимосвязанные группы: 1) «аддитивное производство» и «гибридное аддитивно-субтрактивное производство»; 2) «интенсивное поверхностное пластическое деформирование» и «ультразвуковая упрочняющая обработка»; 3) «аддитивное производство АНС» и «гибридное аддитивно-субтрактивное производство АНС»; 4) «интенсивное поверхностное пластическое деформирование АНС» и «ультразвуковая упрочняющая обработка АНС». В ходе выполнения работы проводился сравнительный анализ общего количества публикаций в каждой из вышеназванных групп за период с 2013-го по 2022-й год.

#### IV. Обсуждение результатов

Динамика количества публикаций в первой и второй группах за период с 2013-го по 2022-й год обладает экспоненциальным характером (рис. 1), что свидетельствует о перманентно возрастающей научно-практической значимости технологий АП, ГАСП, ИППД и УУО в различных отраслях промышленности. Величина достоверности аппроксимации  $R^2 > 0,98$  для всех представленных на рис. 1 зависимостей, что свидетельствует о высоком качестве их аппроксимации экспоненциальной функцией. Важно отметить, что устойчивый рост числа публикаций по запросу «ГАСП» отражает будущие перспективы развития гибридного аддитивно-субтрактивного производства, несмотря на сравнительно невысокую долю статей по данному запросу (~2,5 %) относительно общего количества источников по запросу «АП» за рассматриваемый период (115 492 статей) (рис. 1а). Аналогичная тенденция наблюдается для второй категории поисковых запросов («ИППД», «УУО»): количество публикаций с каждым годом увеличивается приблизительно на 15–20 %, только за 2022 год опубликовано свыше 10-ти и 15-ти тысяч статей по проблемам ИППД и УУО соответственно. УУО является нетрадиционным, но апробированным и широко распространенным методом упрочнения и постобработки (рис. 1б), что обуславливает высокий потенциал его применения как метода постобработки в ГАСП.

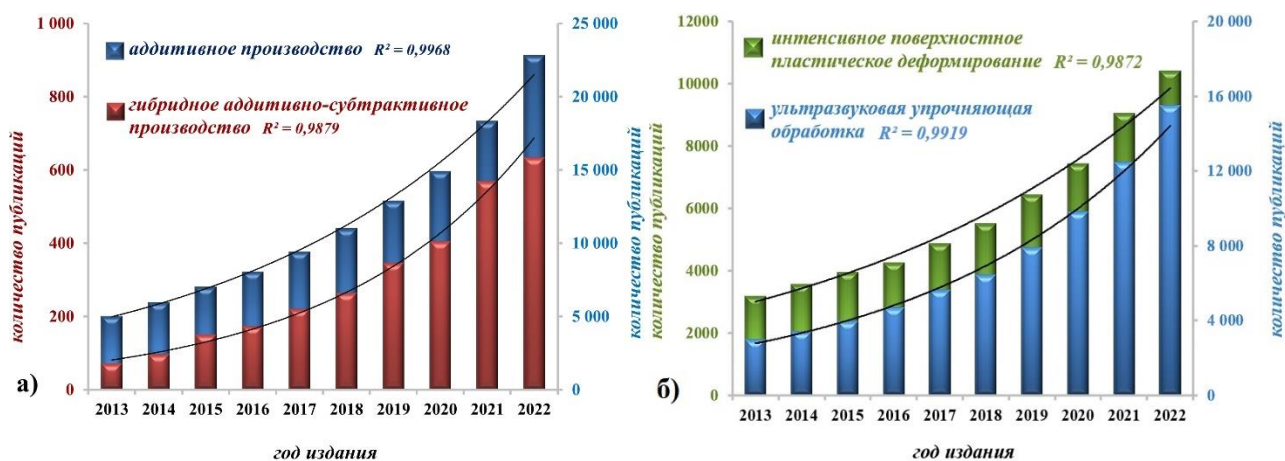


Рис. 1 Количество публикаций за период с 2013-го по 2022-й год по запросам (а) – «аддитивное производство» и «гибридное аддитивно-субтрактивное производство»; (б) – «интенсивное поверхностное пластическое деформирование» и «ультразвуковая упрочняющая обработка»

Поисковые запросы за период с 2013-го по 2022-й год в третьей и четвертой группе дополнены термином «АНС» (рис 2).

С 2013-го по 2019-й год наблюдается немонотонный рост числа публикаций по проблеме аддитивного производства аустенитных нержавеющей сталей, тогда как с 2020-го года происходит устойчивое развитие АП АНС как научно-производственного направления, что подтверждается статистическими данными (рис. 2а).

За 2022-й год доля публикаций по запросу «ГАСП АНС» составляет около 50 % относительно количества источников по запросу «АП АНС» за аналогичный период, что обуславливает высокий потенциал развития гибридного аддитивно-субтрактивного производства аустенитных нержавеющей сталей. Количество источников по проблеме УУО АНС с каждым годом увеличивается ~10 %, за последние 10 лет опубликовано около 1200 научных трудов, что составляет около 30 % от числа публикаций по запросу «интенсивное поверхностное пластическое деформирование АНС» (рис. 2б).

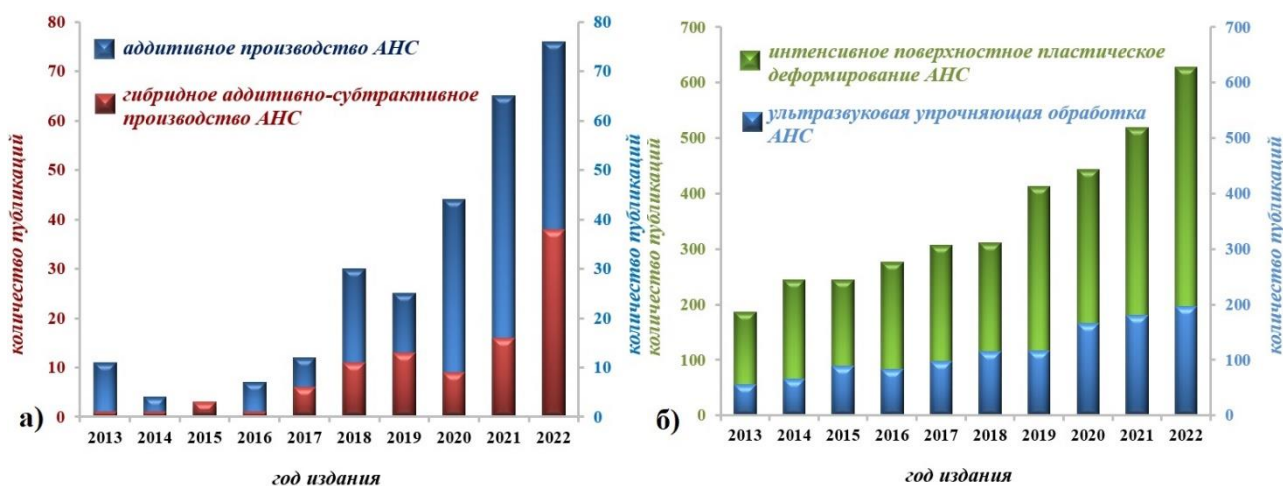


Рис. 2. Количество публикаций за период с 2013-го по 2022-й год по запросам (а) – «аддитивное производство АНС» и «гибридное аддитивно-субтрактивное производство АНС»; (б) – «интенсивное поверхностное пластическое деформирование АНС» и «ультразвуковая упрочняющая обработка АНС»

Таким образом, применение ИППД и, в том числе, УУО в качестве метода постобработки является перспективным направлением развития традиционных технологий и технологий аддитивного производства прототипов изделий из аустенитных нержавеющей сталей, что подтверждается результатами литературного обзора, наглядно демонстрирующего актуальность применения УУО в ГАСП для повышения функциональных характеристик прототипов изделий из АНС при 3D-печати [17] с использованием дуговых [18] и лучевых методов [19].

## V. Заключение

Применение УУО в ГАСП в качестве метода постобработки изделий из АНС является перспективным подходом к повышению их функциональных характеристик, что подтверждается результатами аналитического обзора количества публикаций за период с 2013-го по 2022-й год. Устойчивое развитие АП АНС как научно-производственного направления происходит с 2020-го года, при этом за 2022-й год доля публикаций по запросу «ГАСП АНС» составляет порядка 50 % относительно количества источников по запросу «АП АНС» за аналогичный период.

Из совокупного количества источников по запросу «ИППД АНС» третью часть составляют публикации по запросу «УУО АНС», что свидетельствует о востребованности УУО как метода постобработки в традиционных и аддитивных технологиях производства прототипов изделий из аустенитных нержавеющей сталей.

Научный руководитель: Полонянкин Денис Андреевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Beard W., Lancaster R., Barnard N. [et al.]. The influence of surface finish and build orientation on the low cycle fatigue behaviour of laser powder bed fused stainless steel 316L // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 864. P. 144593. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144593>.
2. DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S. [et al.]. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
3. Tiamiyu A. A., Eduok U., Szpunar J. A. [et al.]. Corrosion behavior of metastable AISI 321 austenitic stainless steel: Investigating the effect of grain size and prior plastic deformation on its degradation pattern in saline media // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 12116. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48594-3>.
4. Kumar S. M., Kannan A. R., Pramod R. [et al.]. Microstructure and high temperature performance of 321 SS wall manufactured through wire + arc additive manufacturing // *Materials Letters*. 2022. Vol. 314. P. 131913. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131913>.
5. Ma M., Wang Z., Gao M. [et al.]. Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 215. P. 142–150. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.034>.
6. Ma G., Li L., Chen Y. Effects of beam configurations on wire melting and transfer behaviors in dual beam laser welding with filler wire // *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 91. P. 138–148. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.019>.
7. Moskvina V. A., Melnikov E. V., Astafurov S. V. [et al.]. Stable high-nickel austenitic steel produced by electron beam additive manufacturing using dual wire-feed system // *Materials Letters*. 2021. Vol. 305. P. 130863. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130863>.
8. Yin Q., Chen G., Cao H. [et al.]. Transformation law of microstructure evolution and mechanical properties of electron beam freeform fabricated 321 austenitic stainless steel // *Vacuum*. 2021. Vol. 194. P. 110594. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110594>.
9. Kim M. S., Park S. H., Pyun Y. S. [et al.]. Optimization of ultrasonic nanocrystal surface modification for surface quality improvement of directed energy deposited stainless steel 316L // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, no. 6. P. 15102–15122. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.092>.
10. Zhou C., Jiang F., Xu D. [et al.]. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment // *Journal of Materials Processing Tech.* 2020. Vol. 280. P. 116599. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
11. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A. [et al.]. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review // *Metals*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 279. Doi: <https://doi.org/10.3390/met13020279>.
12. Laleh M., Sadeghi E., Revilla R. I. [et al.]. Heat treatment for metal additive manufacturing // *Progress in Materials Science*. 2023. Vol. 133. P. 101051. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101051>.
13. Ye C., Zhang C., Zhao J. [et al.]. Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30, no. 9. P. 6407–6425. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06021-7>.
14. Zhou C., Wang J., Guo C. [et al.]. Numerical study of the ultrasonic impact on additive manufactured parts // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 197. P. 106334. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106334>.

15. Gao S., Liu R., Huang R. [et al.]. A hybrid directed energy deposition process to manipulate microstructure and properties of austenitic stainless steel // *Materials & Design*. 2022. Vol. 213. P. 110360. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110360>.

16. Yang X., Wang X., Ling X. [et al.]. Enhanced mechanical behaviors of gradient nano-grained austenite stainless steel by means of ultrasonic impact treatment // *Results in Physics*. 2017. Vol. 7. P. 1412–1421. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.002>.

17. Vorontsov A., Astafurov S., Melnikov E. [et al.]. The microstructure, phase composition and tensile properties of austenitic stainless steel in a wire-feed electron beam melting combined with ultrasonic vibration // *Materials Science & Engineering A*. 2021. Vol. 820. pp. 141519. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141519>.

18. Diao M., Guo C., Sun Q. [et al.]. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment // *Materials Science & Engineering A*. 2022. Vol. 857. P. 144044. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144044>.

19. Yuan D., Sun X., Sun L. [et al.]. Improvement of the grain structure and mechanical properties of austenitic stainless steel fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration // *Materials Science & Engineering A*. 2021. Vol. 813. P. 141177. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141177>.

*Дата поступления статьи: 27.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 13.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Т. М. Гомонюк, 2023

УДК 661.666.4:519.237.4

*О. В. Дубовик, Т. В. Смородина, К. А. Белоус, В. В. Калинин*

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

## **ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА**

**Аннотация.** По микрофотографиям растровой электронной микроскопии проведен дисперсионный анализ частиц гранулированного и негранулированного электропроводного технического углерода производства «Омск Карбон Групп». Определены параметры распределения частиц в микрометровом диапазоне. Показано, что углерод обеих марок является полидисперсным. Основная фракция частиц марки СН-85 на 5 мкм крупнее, чем негранулированного СНxxx.

**Ключевые слова:** электропроводный технический углерод, дисперсионный анализ, электронная микроскопия.

### **I. Введение**

Широкое применение электропроводящих полимерных композиционных материалов, содержащих технический углерод (ТУ) [1, 2, 3], обуславливает интерес к расширению ассортимента таких материалов и области их применения. Данные композиционные материалы применяются в электронике и радиотехнике для изготовления

пьезоэлектрического ленточного волокна [4], приборостроении [5], машиностроении и других областях. Большое значение при разработке композиционных материалов, содержащих ТУ, приобретают параметры и характеристики ТУ, определяющие свойства композиционного материала. Например, размеры частиц ТУ среди других характеристик ТУ определяют проводимость композиционных материалов, их механические свойства и особенности технологического процесса получения материалов. Например, в [6] отмечается, что увеличение дисперсности частиц исходного технического углерода приводит к повышению прочностных свойств, а также к снижению износостойкости эластомеров.

Таким образом, измерение размера частиц является актуальным для определения сферы применения той или иной марки технического углерода.

## **II. Постановка задачи**

В работе исследовалось распределение структурных элементов гранулированного электропроводного ТУ марки СН-85 и негранулированного ТУ экспериментальной марки серии СН (условное обозначение СНххх) производства «Омск Карбон Групп» по размерам в микрометровом диапазоне.

Цель работы: определить основные фракции частиц в электропроводном гранулированном и негранулированном техническом углероде методом дисперсионного анализа.

## **III. Теория**

Структура частиц ТУ характеризуется различными уровнями иерархии (макро-, микро- и наноуровень). Наименьшее первичное образование ТУ – кристаллит, размеры которого, как правило, составляют единицы нанометров. Из кристаллитов формируются частицы (глобулы), размеры которых составляют десятки и сотни нанометров [7]. Для транспортировки ТУ гранулируют. Размер гранул лежит в диапазоне от сотен микрометров до единиц миллиметров [7]. Гранулы ТУ при транспортировке могут разрушаться с образованием крупных глобул. При смешивании компонентов смеси, например, ТУ и полиэтилен, в экструдере и последующем спекании под давлением на структурные единицы ТУ оказывается механическое воздействие, под действием которого гранулы и частицы также могут разрушаться с образованием в композиционном материале структурных элементов с меньшими размерами. По этой причине диапазон размеров структурных элементов ТУ в микрометровом диапазоне может быть достаточно широким.

## **IV. Результаты экспериментов и их обсуждение**

Дисперсионный анализ структурных элементов (далее – частиц) ТУ проводился по методике [8]. Размеры частиц ТУ определялись по микрофотографиям, полученным на электронном микроскопе Jeol JSM-5700 методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Микрофотографии выполнялись с варьируемым увеличением в диапазоне от 100 до 1000 крат увеличения. Для каждой марки ТУ было сделано 11 микрофотографий, снимки были сделаны в различных точках образца для обеспечения большего числа частиц для анализа и получения более достоверных данных. Получение большего количества микрофотографий не рационально, так как полученное количество частиц полностью обеспечивает точность расчётов. Общее количество частиц, размеры которых определялись по микрофотографиям, равно 281. Минимальный размер частиц равен 4 мкм, максимальный – 96 мкм. Для примера на рис. 1 представлены два образца, по которым видны морфологические отличия гранулированного и негранулированного технического углерода.



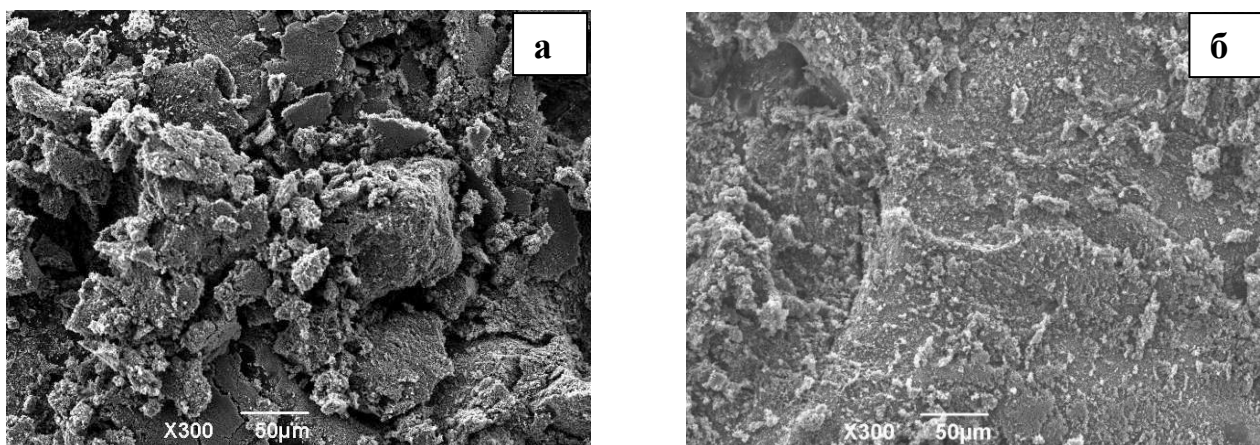


Рис. 1. РЭМ изображения морфологии поверхности технического углерода:  
а – гранулированный СН-85; б – негранулированный СНxxx

Кривые численного распределения частиц по размерам приведены на рис. 2.

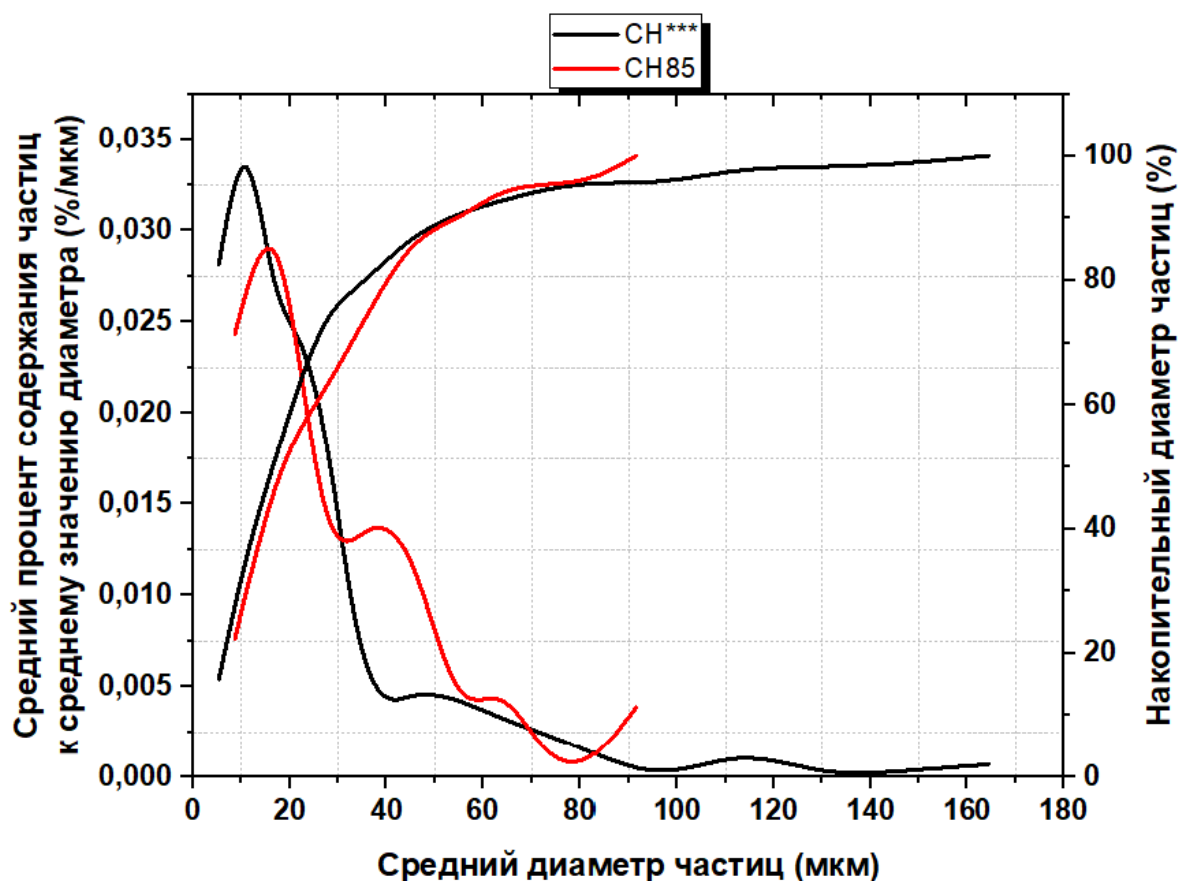


Рис. 2. Интегральные и дифференциальные кривые численного распределения частиц ТУ по размерам

Как следует из рис. 2, технический углерод представленных марок является высокополидисперсным: у гранулированного ТУ диаметр максимального количества частиц на 5 мкм больше, чем у негранулированного. Основная фракция частиц СН-85 находится в интервале 10–25 мкм, а СНxxx – 5–15 мкм.

Полидисперсность образцов подтверждается математическими расчётами, выполненными в программе Mathcad по методике [8].

Среднечисленный диаметр частиц определяли по формуле:

$$\bar{d}_n = \sum_i \frac{n_i}{\sum_i n_i} \cdot d_i, \quad (1)$$

где  $n_i$  – число частиц в  $i$ -й фракции с размером  $d_i$ .

Среднеобъемный диаметр частиц определяли по формуле:

$$\bar{d}_w = \sum_i \frac{n_i \cdot d_i^3}{\sum_i n_i d_i^3} \cdot d_i. \quad (2)$$

Степень полидисперсности частиц определяли по формуле:

$$П = \frac{\bar{d}_n}{\bar{d}_w}. \quad (3)$$

Коэффициент вариации размеров частиц определяли по формуле:

$$K_n = \frac{\sigma}{\bar{d}_n} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение, которое характеризует широту распределения частиц по размерам. Рассчитанные значения параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Параметры статистических распределений частиц**

Марка ТУ	$\bar{d}_n$ , мкм	$\bar{d}_w$ , мкм	$П$ , усл.ед.	$K_n$ , %	$\sigma$ , усл.ед.
СН-85	34	70	0,49	61	20,86
СНxxx	33	125	0,26	95	31,05

Для определения типа распределения частиц по размерам рассчитаны коэффициенты корреляции (таблица 2) между дифференциальной кривой численного распределения частиц по размерам и уравнениями нормального, логнормального и экспоненциального распределений.

Эти данные были обработаны с использованием математического пакета OriginPro 8.6 компании OriginLab Corporation.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции**

Марка ТУ	Распределение		
	нормальное	логнормальное	экспоненциальное
СН-85	-0.28	0,58	0,95
СНxxx	-0,13	0,83	0,92

Рассчитанные коэффициенты корреляции показали, что экспериментальные кривые распределения частиц гранулированного и негранулированного ТУ точнее всего описываются уравнением экспоненциального распределения (рис. 3).

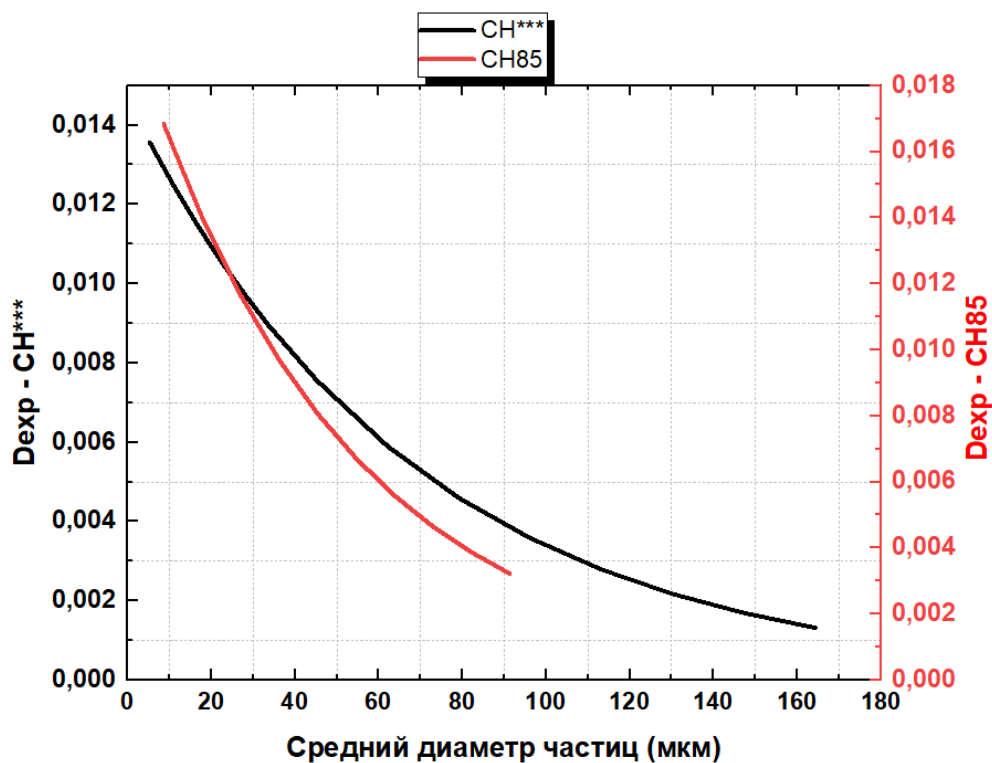


Рис. 3. Экспоненциальное распределение среднего диаметра частиц ТУ

## V. Выводы

Полидисперсность образцов подтверждается низким значением степени полидисперсности, которое существенно меньше 1, и большим значением коэффициента вариации, характеризующего широту распределения частиц по размерам. Можно предположить, что наличие большого количества частиц ТУ с размером до 50 мкм связано с частичным разрушением гранул при транспортировке. С другой стороны, присутствие более мелких частиц электропроводного технического углерода при создании композиционных материалов позволяет достичь более высоких значений электропроводности.

Полученные результаты будут учитываться в дальнейшем при выборе длительности комплексного процесса измельчения, смешивания компонентов и их механоактивации в мельнице при создании новых полимерных композиционных материалов.

Таким образом, по результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

- Технический углерод – полидисперсный материал с коэффициентом полидисперсности меньше 0,5: СНxxx – 0,26; СН-85 – 0,49.

- Распределения частиц гранулированного и негранулированного ТУ в микрометровом диапазоне точнее всего описываются уравнениями экспоненциального распределения.

- Основная фракция частиц технического углерода марки СН-85 составляет 10–25 мкм, а СНxxx – 5–15 мкм.

Научный руководитель: Даньшина Валентина Владимировна, Омский государственный технический университет.

Научные консультанты: Кропотин Олег Витальевич, Омский государственный технический университет, Дроздова Екатерина Андреевна, ООО «Омсктехуглерод».

Авторы благодарят директора НОРЦ «Нанотехнологии» ОмГТУ Рогачева Е. А. и инженера НОРЦ Каленчук А. А. за помощь в проведении исследований.



### Библиографический список

1. Шиянова К. А., Торкунов М. К., Гудков М. В. [и др.]. Электропроводящие полимерные композиты сегрегированной сетчатой структуры, наполненные восстановленным оксидом графена и одностенными углеродными нанотрубками // Полимеры. 2022. С. 133–134. DOI: 10.30826/POLYMERS-2022-38.
2. Donnet J. V., Carbon Black : Science and Technology, Second Edition. 2017. 482 p.
3. Степашкина А. С., Цобкалло Е. С., Москалюк О. А. [и др.]. Моделирование электропроводности композитных материалов, полученных на основе полипропилена и технического углерода // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 2. С. 7–14.
4. Lee S., Duong Q. V., Her N. [et al.]. High-flexibility piezoelectric ribbon fiber fabrication through multi-material thermal drawing // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. Vol. 36. P. 3089–3096.
5. Марков А. В., Марков В. А., Чижов А. С., Влияние характеристик полиэтилена на термоэлектрические свойства полиэтиленовых композитов с техническим углеродом // Пластические массы. 2021. № 5–6. С. 18–23.
6. Макаров И. С., Дьяконов А. А., Петрова Н. Н. [и др.]. Исследование влияния технического углерода на свойства изопреновых эластомеров // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 154–163.
7. Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А., Кохановская О. А. Технологии модификации технического углерода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 160 с.
8. Дудина А. А. Дисперсионный анализ // NovaInfo. 2017. № 58. С. 4–9. URL: <https://novainfo.ru/article/10339> (дата обращения: 15.12.2022).

*Дата поступления статьи: 30.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 14.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© О. В. Дубовик, Т. В. Смородина, К. А. Белоус, В. В. Калинин, 2023

УДК 620.17

*А. Р. Закранцов, И. В. Мишин, А. В. Матюков, А. А. Тарасова, Н. А. Семенюк*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ И УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

**Аннотация.** В работе представлены результаты компьютерного моделирования зависимости относительных деформаций и максимальных напряжений, возникающих в уплотнительном элементе из политетрафторэтилена (ПТФЭ), модифицированного наноразмерным диоксидом циркония и техническим углеродом, от концентрации наполнителя. По результатам моделирования определено, что при концентрации модификатора 4 % относительная деформация для ПТФЭ, модифицированного техническим углеродом, ниже в 1,15 раза, чем для ПТФЭ, модифицированного диоксидом циркония.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, технический углерод, диоксид циркония, компьютерное моделирование.

## I. Введение

В настоящее время особое внимание уделяется развитию нанотехнологий. При разработке композитов и использовании модификаторов с размерами частиц нанометрового диапазона свойства этих материалов могут принципиально изменяться. Для изучения таких материалов могут использоваться теоретические методы (компьютерное моделирование), применение которых позволяет значительно сократить материальные и временные затраты на разработку.

При использовании политетрафторэтилена (ПТФЭ) необходимо учитывать некоторые его недостатки, которые заключаются, с одной стороны, в низкой износостойкости, с другой стороны, в повышенной ползучести ПТФЭ при длительных нагрузках, что не позволяет использовать материал достаточно широко. Для устранения данных недостатков применяется модификация политетрафторэтилена различными наполнителями [1–3]. Объемная модификация ПТФЭ техническим углеродом позволит повысить износостойкость политетрафторэтилена, а применение диоксида циркония позволит снизить ползучесть данного материала при статических нагрузках. Объект исследования – объемно модифицированный политетрафторэтилен наноразмерными частицами диоксида циркония  $ZrO_2$  и технического углерода П172, предмет исследования – зависимость механических свойств модифицированного ПТФЭ от концентрации наполнителя.

## II. Постановка задачи

Основной задачей работы являлось сравнение механических свойств ПТФЭ, модифицированного различными концентрациями наночастиц диоксида циркония и углерода. Сравнение проводилось с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе ANSYS. Процесс моделирования заключался в исследовании относительной деформации и максимального напряжения уплотнительного элемента из ПТФЭ, модифицированного наноразмерными частицами диоксида циркония и технического углерода при разных концентрациях.

## III. Теория

Физико-механические свойства композиционного материала (КМ) в значительной мере определяются свойствами его компонентов. Для получения корректных результатов необходимо добиться репрезентативности свойств объекта моделирования относительно характеристик композиционного материала.

Для построения модели КМ на основе ПТФЭ необходимо рассчитать объемную концентрацию наполнителя. Расчет проводился согласно методике [4] по формуле (1):

$$n(V) = \frac{V(n)}{V(\text{общ})}, \quad (1)$$

где  $n(V)$  – объемная концентрация наполнителя;  $V(n)$  – объем наполнителя (диоксида циркония или технического углерода).

Количество частиц наполнителя зависит от его концентрации в ПТФЭ (практически используются массовые концентрации в пределах от 4 до 24%, поскольку это промышленно применяемый диапазон концентраций). Для объемно-модифицированного ПТФЭ расстояние между частицами наполнителя при различных концентрациях можно рассчитать по формуле (2):

$$X = \left( \frac{D}{\sqrt[3]{n(V)}} \right) - D, \quad (2)$$

где  $D$  – размер частицы.

На рис. 1 представлены зависимости расстояния между частицами от концентрации наполнителя.

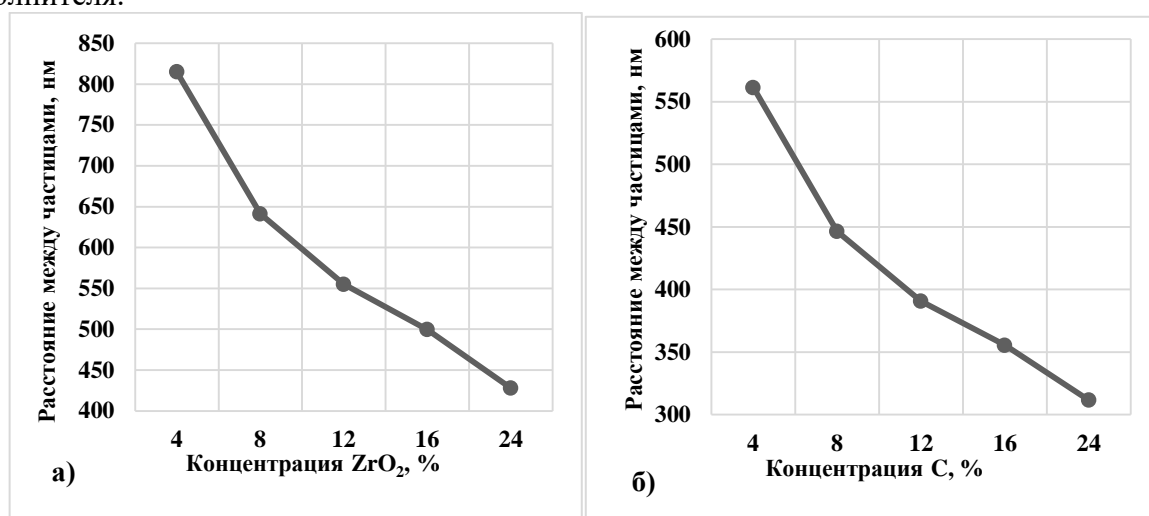


Рис. 1. График зависимости расстояния между частицами наполнителя в ПТФЭ от его концентрации: а) диоксид циркония, б) технический углерод

Очевидно, что с увеличением концентрации модификатора расстояние между его частицами уменьшается. При одинаковых концентрациях модификаторов расстояние между частицами для диоксида циркония больше, чем для технического углерода. При концентрации 12% разница в расстоянии между частицами наполнителя составляет 29%. Это обусловлено тем, что плотность частиц диоксида циркония выше, чем технического углерода.

#### IV. Результаты экспериментов и их обсуждение

В программе ANSYS исследовались свойства моделей уплотнительного элемента из политетрафторэтилена, модифицированного наноразмерными частицами диоксида циркония и технического углерода, при нагружении их давлением в 28 МПа. На рис. 2 представлена модель напряженно-деформированного состояния уплотнительного элемента из ПТФЭ с концентрацией диоксида циркония 4%.

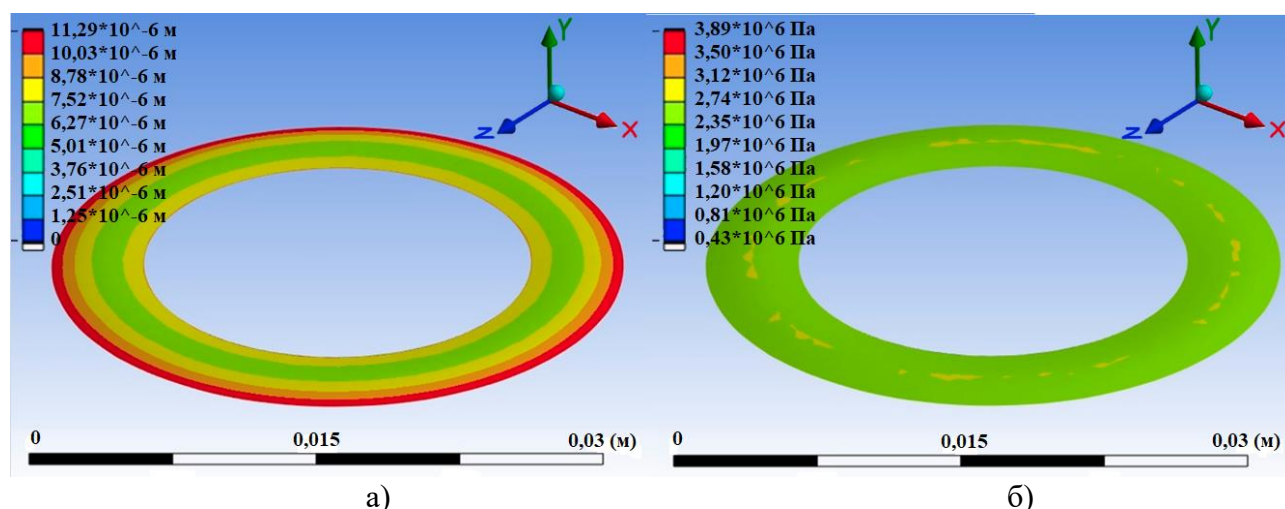


Рис. 2. Свойства модели напряженно-деформированного состояния уплотнительного элемента из ПТФЭ с концентрацией диоксида циркония 4%:  
а) относительные деформации б) максимальные напряжения

Из рис. 2 следует, что максимальные относительные деформации возникают по краям модели уплотнительного элемента, а минимальные приходятся на её внутреннюю часть. Максимальные напряжения приходятся на центральную часть уплотнительного элемента и составляют от 2,7 до 3,1 МПа.

На рис. 3 представлена зависимость механических свойств от концентрации наноразмерного диоксида циркония объемно модифицированного ПТФЭ в модели уплотнительного элемента.

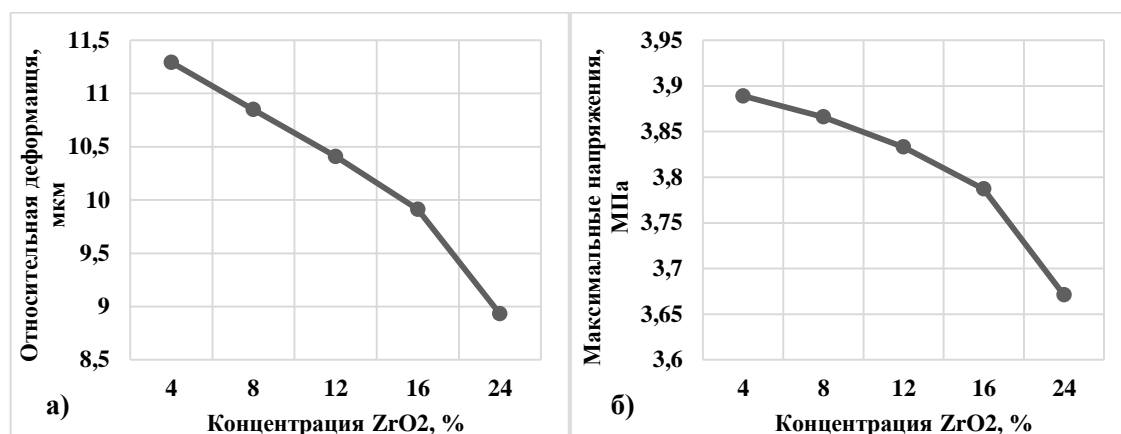


Рис. 3. Зависимость механических свойств уплотнительного элемента из ПТФЭ от концентрации наноразмерного диоксида циркония в модели уплотнительного элемента: а) относительные деформации; б) максимальные напряжения

При увеличении концентрации диоксида циркония в ПТФЭ как относительные деформации, так и максимальные напряжения уменьшаются.

На рис. 4 представлена модель напряженно-деформированного состояния уплотнительного элемента из ПТФЭ с концентрацией технического углерода 4%.

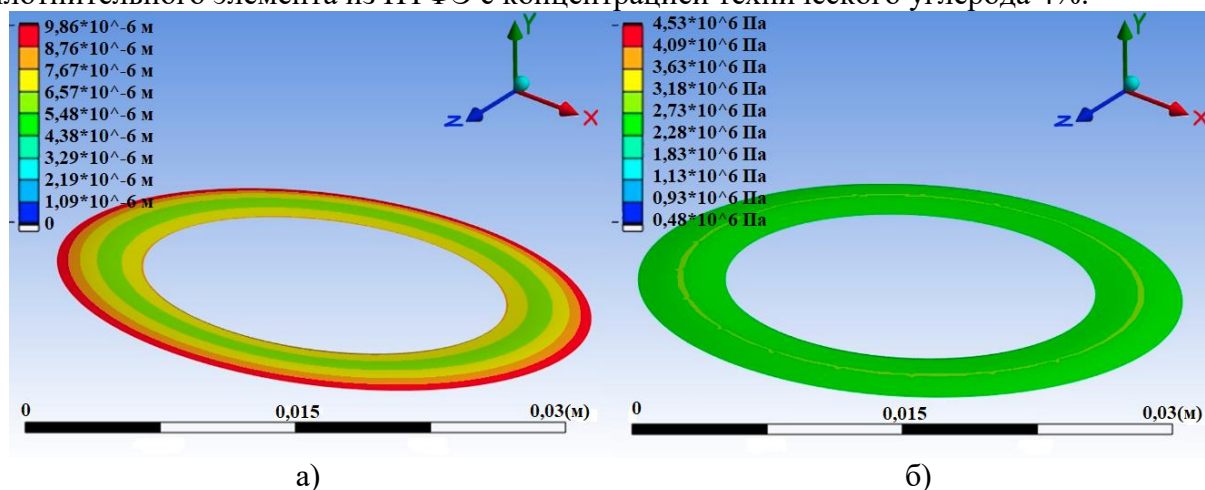


Рис. 4. Модель напряженно-деформированного состояния уплотнительного элемента из ПТФЭ, модифицированного 4% техническим углеродом: а) относительные деформации; б) максимальные напряжения

Распределение относительных деформаций и максимальных напряжений, возникающих в уплотнительном элементе из ПТФЭ, модифицированного 4% техническим углеродом, при нагрузке 28 МПа аналогично ПТФЭ, модифицированному 4% диоксидом циркония при этих же параметрах нагрузки. Значение максимальной относительной

деформации для ПТФЭ, модифицированного 4% техническим углеродом, уменьшается на 13% по отношению к ПТФЭ, модифицированному 4% диоксида циркония.

На рис. 5 представлена зависимость механических свойств объемно модифицированного ПТФЭ от концентрации наноразмерного технического углерода.

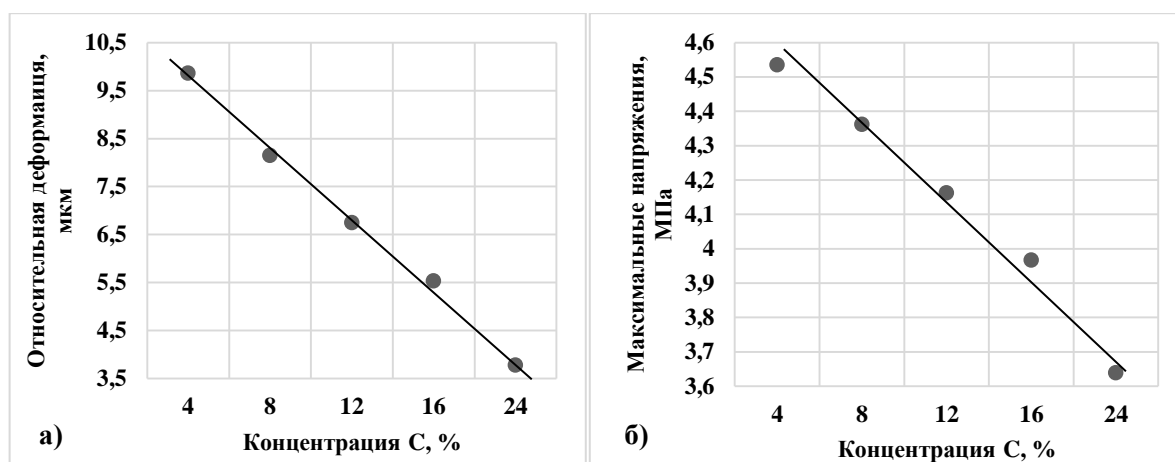


Рис. 5. Зависимость механических свойств уплотнительного элемента из ПТФЭ от концентрации наноразмерного технического углерода в модели уплотнительного элемента: а) относительные деформации; б) максимальные напряжения

Из рис. 5 следует, что при увеличении концентрации технического углерода в ПТФЭ относительные деформации, а также максимальные напряжения уменьшаются линейно.

## V. Заключение

Проведенное в программе ANSYS компьютерное моделирование механических свойств уплотнительного элемента из ПТФЭ, модифицированного наночастицами технического углерода и диоксида циркония с концентрациями 4%, 8%, 12%, 16% и 24%, позволяет сделать следующие выводы:

1. При одинаковом размере частиц – 200 нм – и равных концентрациях наноразмерного диоксида циркония и технического углерода в ПТФЭ расстояния между частицами модификаторов значительно отличаются. Отличие составляет ~ 170 нм (26 %). Это обусловлено тем, что отношение массы частиц диоксида циркония к единице объема выше, чем у технического углерода.

2. Максимальные относительные деформации возникают по краям модели уплотнительного элемента, а минимальные приходятся на её внутреннюю часть. При увеличении концентрации наполнителя в политетрафторэтилене стойкость материала к деформациям возрастает, при этом напряжения в моделях снижаются, как с наполнителем в виде наночастиц диоксида циркония, так и с наполнителем в виде наноразмерного технического углерода.

3. При одинаковой концентрации наполнителя и фиксированной нагрузке максимальные относительные деформации и максимальные напряжения, возникающие в композите с диоксидом циркония, больше, чем в композите с техническим углеродом. Так, при концентрации наполнителя 24% и давлении в 28 МПа максимальные относительные деформации, возникающие в композите с техническим углеродом, на 50% меньше, чем в композите с диоксидом циркония. Напряжения, возникающие в композите с техническим углеродом, на 3% меньше максимальных напряжений, возникающих в композите с  $ZrO_2$ .

Научный руководитель: Теплоухов Андрей Анатольевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Машков Ю. К., Полещенко К. Н., Еремин Е. Н. [и др.]. Получение слоисто-армированного нанокompозита на основе политетрафторэтилена методами лазерной абляции и ионно-плазменного модифицирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 12(192). С. 531–538.

2. Васильев А. П. и др. Эксплуатационные характеристики политетрафторэтилена разных марок, модифицированных углеродными волокнами // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. №. 4 (60). С. 34–46.

3. Федоров П. П., Яроцкая Е. Г. Диоксид циркония. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. Т. 23, №. 2. С. 169–187.

4. Закранцов А. Р., Ильин А. А., Карчигин О. П. [и др.]. Компьютерное моделирование влияния концентрации диоксида циркония на механические свойства композита на основе политетрафторэтилена // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-22): Мат. Рег. молодежн. науч.-практ. конф., 21 апреля 2022 г. Омск, 2022. С. 165–170.

*Дата поступления статьи: 04.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Р. Закранцов, И. В. Мишин, А. В. Матюков, А. А. Тарасова, Н. А. Семенюк, 2023

УДК 539.421

*В. Н. Ильина, С. В. Ильин, В. А. Гафарова, И. Р. Кузеев*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия*

### **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТА НА ЭПОКСИДНОЙ ОСНОВЕ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ФУЛЛЕРЕНАМИ И КЕРОСИНОМ, СОДЕРЖАЩИМ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА, ДЛЯ ЗАДЕЛКИ ТРЕЩИН**

**Аннотация.** Проведено исследование возможности применения композиционного материала для заделки трещин. Объектом исследования был фрагмент газопровода с трещиной, находящейся в области сварного шва. Заполнение дефекта проводилось композитом на эпоксидной основе с наноуглеродным наполнителем (фуллереном) и керосином, содержащим наноразмерные частицы оксида железа, в качестве разбавителя. Показано, что рассматриваемый композиционный материал при использовании вакуумсоздающего устройства заполнил полости разветвленной трещины с шириной раскрытия у поверхности около 0,25 мм.

**Ключевые слова:** композиционный материал, фуллерен, трещины, наноразмерные наполнители.

### **I. Введение**

Композиционные материалы нашли применение для заделки трещин в различных сферах промышленности. Они используются для восстановления технологического и вспомогательного оборудования в сфере ЖКХ [1], инженерных сооружений из бетона и железобетона, эксплуатирующихся в экстремальных условиях, а также природных

минералов и изделий из них [2]; при ремонтных работах на улично-дорожной сети [3]; для заделки дефектов в защитных покрытиях эмалированного химического оборудования [4] и трещин в нефтегазовой отрасли [5, 6].

Результаты численного моделирования процесса заделки трещины композитом показывают, что скрепление ее берегов приводит к снижению напряжений в вершине трещины [7, 8]. При введении в полость трещиноподобного дефекта жидкого композиционного материала формирование его структуры происходит в локальном объеме, композит взаимодействует с берегами трещины по механизму адгезии, что ограничивает их возможные перемещения. Увеличение проникающей способности композиционного материала позволит заполнить все разветвления трещины, вследствие чего напряжения в ее вершине снизятся.

Влияние нанокремниевых наполнителей на свойства композиционных материалов освещено в работах [9–13]. Авторы показывают перспективность применения углеродных наноматериалов в качестве наполнителей, так как их добавление в состав композитов приводит к улучшению физико-механических свойств. Отмечается также увеличение адгезии композиционных материалов к подложкам различной природы. Высокая модифицирующая способность нанонаполнителей определяется значительной площадью их удельной поверхности, что дает возможность при относительно небольшой концентрации частиц перекрывать суммарную площадь границ раздела между матрицей и дисперсной фазой.

## **II. Постановка задачи**

В качестве матрицы разрабатываемых композитов выбрана эпоксидная смола ЭД-20, для ее отверждения применялся полиэтиленполиамин. В качестве армирующего наполнителя использовались фуллерены C<sub>60</sub> (производства «НеоТекПродакт»). Они являются трехмерными аллотропными формами углерода и представляют собой многоатомные молекулы с замкнутым объемом и поверхностью большой кривизны.

В качестве разбавителя применялся керосин, содержащий магнитные частицы Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> размером от 5 до 30 нм, выбор которого согласно [14] обусловлен снижением сопротивления движения в узких каналах.

Соотношение компонентов в композиционном материале было выбрано, исходя из проведенных ранее авторами полных факторных экспериментов [15], в результате которых определены оптимальные составы для обеспечения требуемого баланса адгезионной и когезионной прочности композитов.

Целью работы являлось исследование возможности применения композиционного материала на основе эпоксидной смолы с нанокремниевым наполнителем (фуллереном) и керосином, содержащим наноразмерные частицы оксида железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в качестве разбавителя для заделки трещин.

## **III. Результаты и их обсуждение**

Объектом исследования был фрагмент магистрального газопровода из стали класса прочности X70 (09Г2С) диаметром D = 1420 мм.

Для наглядного представления дефектов на поверхности образца была проведена цветная дефектоскопия в соответствии с ГОСТ 18442-80. В результате чего выявлена трещина в области сварного шва (рис. 1а).

Данная область была дополнительно исследована методом магнитно-порошковой дефектоскопии в соответствии ГОСТ Р 56512-2015, на рис. 1б приведено обнаруженное внутреннее разветвление трещины.

Ранее было проведено исследование связи распределения поверхностной энергии на рассматриваемом темплете с расположением трещин. Полученные результаты описаны в



работе [16]. Поскольку область трещины обладает минимальной поверхностной энергией, было сделано предположение, что при образовании трещины появляется дополнительная поверхность, и энергия перераспределяется.

Обнаруженная на поверхности трещина (рис. 1) была заполнена композиционным материалом на основе эпоксидной смолы с наночастицами углерода (фуллереном) и ксеросилом, содержащим наноразмерные частицы оксида железа  $Fe_2O_3$ , в качестве разбавителя. Для лучшего проникновения композита в полость трещины использована методика, предложенная Гафаровой В. А. [6, 17]: внедрение ремонтного состава под действием вакуума, что позволяет увеличить его проникающую способность в полость дефекта по сравнению с гравитационным проникновением (рис. 2).

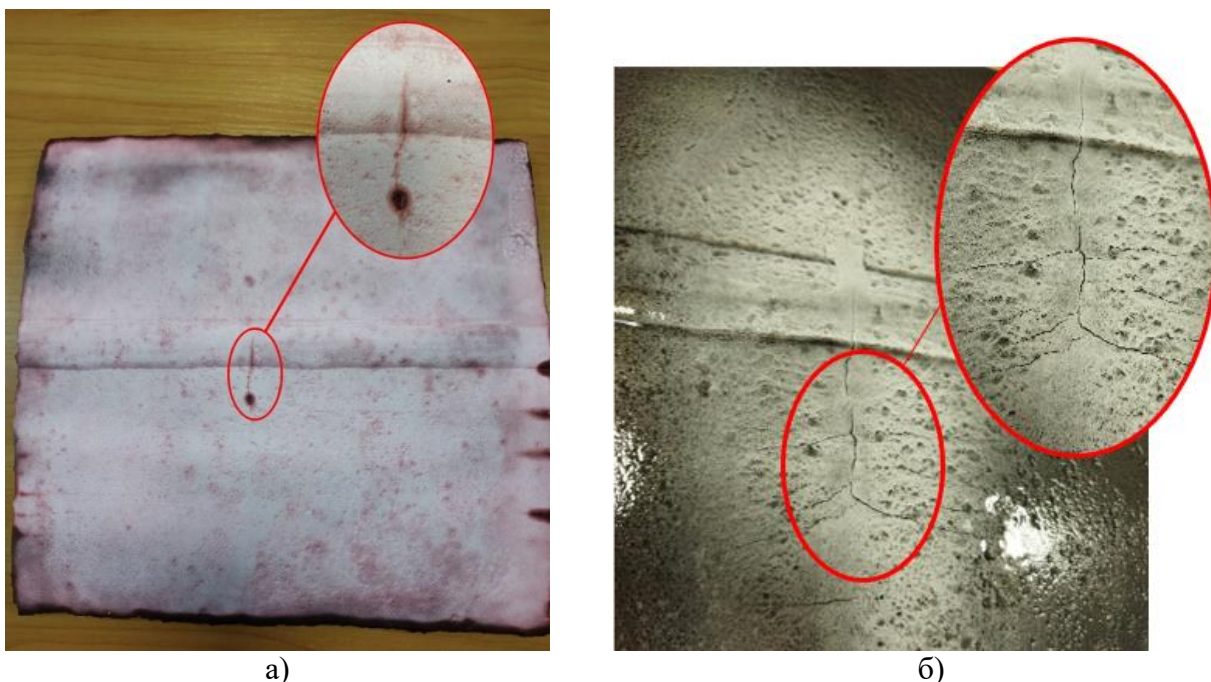


Рис. 1. Фотография выявленной разветвленной трещины в области сварного шва: (а) – цветная дефектоскопия, (б) – магнитно-порошковая дефектоскопия



Рис. 2. Внедрение композиционного материала в полость трещины под действием вакуума



После полного застывания композиционного материала повторно проведена цветная дефектоскопия, в результате которой дефекта на поверхности исследуемого фрагмента трубы обнаружено не было.

Для изучения степени проникновения композита в полость трещины темплет был разрезан на электроэрозионном станке Exsetek ED30C поперек видимой на поверхности части заделанной трещины. Место вырезки образца показано белой пунктирной линией на рис. 3а. Фотография полученного образца приведена на рис. 3б.

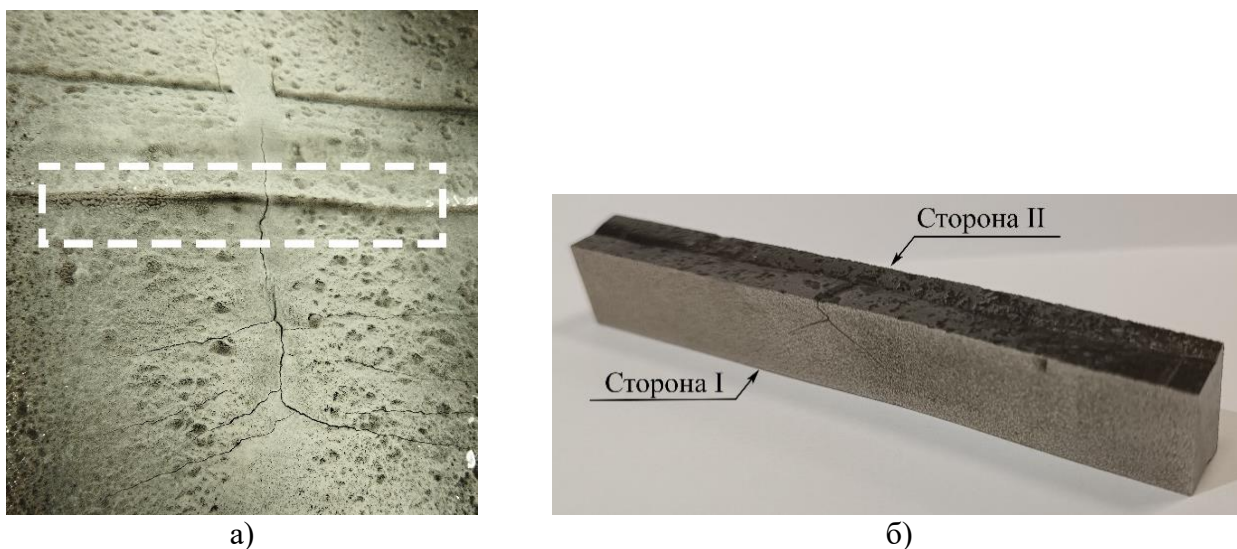


Рис. 3. Схема места вырезки (а) и фотография полученного образца (б)

На рис. 4 приведены макроснимки образца с двух сторон, на которых видна разветвленная трещина. Поскольку композиционный материал имеет черный цвет, предположили, что полости трещины заполнены им.

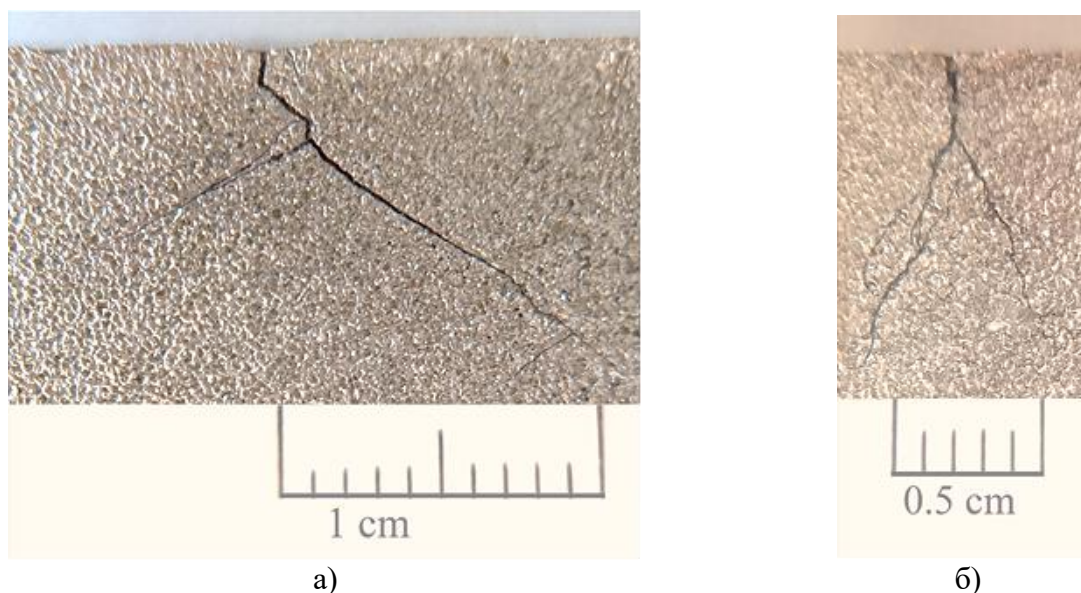


Рис. 4. Фотографии трещины, заполненной КМ:  
(а) – на стороне I, (б) – на стороне II

Данная гипотеза была проверена с использованием микротвердомера. Для этого в несколько точек по длине трещины внедряли индентор. Поскольку после снятия нагрузки оставался отпечаток, сделали вывод, что полость трещины заполнена композитом.

#### IV. Заключение

По методике, предложенной Гафаровой В. А. [6, 17], при использовании вакуумсоздающего устройства было проведено заполнение рассматриваемым композитом полости разветвленной трещины с шириной раскрытия у поверхности около 0,25 мм. Полученные результаты показали перспективность применения композиционного материала на основе эпоксидной смолы с наноуглеродным наполнителем (фуллереном) и керосином, содержащим наноразмерные частицы оксида железа  $Fe_2O_3$ , в качестве разбавителя для заделки трещин.

#### Библиографический список

1. Иванов В. А. Методы восстановления технологического и вспомогательного оборудования износостойкими композиционными материалами: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015. 195 с.
2. Гафарова В. А., Кравцов В. В., Кузеев И. Р. Анализ способов и обзор композиционных материалов для заделки трещин в конструкциях // Актуальные проблемы науки и техники: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 18–20 ноября 2014 г. Уфа, 2014. Т. 2. С. 104–106.
3. Новоселова С. Н. Разработка и исследование свойств низковязких полимерных композитов функционального назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 2012. 16 с.
4. Горбунов Ф. К., Шевцов Ю. Н., Бердникова Л. К. Термодинамические характеристики материалов, применяемых для ремонта дорожного и аэродромного покрытий // Дороги и мосты. 2017. № 2(38). С. 317–327.
5. Крутиков И. Ю. Восстановление работоспособности деталей технических устройств с трещиноподобными дефектами композитными материалами: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2010. 124 с.
6. Гафарова В. А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: дис. ... кан. техн. наук. Уфа, 2019. 132 с.
7. Gafarova V. A., Babin A. Yu., Gareeva E. R. [et al.]. Influence of a filler on strength characteristics of the properties of a composite material based on epoxy resin // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 11, part 1. P. 252–257.
8. Абдрахманова К. Н., Бабин А. Ю., Гареева Э. Р. [и др.]. Моделирование заполнения трещины композитным материалом в программном комплексе Abagus // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов: междунар. науч.-практ. конф., 22–23 марта 2018 г. Уфа, 2018. С. 135–140.
9. Загора А. Г., Кондрашов С. В., Антюфеева Н. В. [и др.]. Исследование влияния технологических режимов изготовления эпоксинаноккомпозитов с углеродными нанотрубками на их теплостойкость // Труды ВИАМ. 2019. № 1(73). С. 64–73. Doi 10.18577/2307-6046-2019-0-1-64-73.
10. Пыхтин А. А. Высокотехнологичные эпоксидные нанодисперсии и нанокомпозиты с регулируемой структурой и комплексом свойств: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 125 с.
11. Иржак Т. Ф., Иржак В. И. Эпоксидные нанокомпозиты // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2017. Т. 59. № 6. С. 485–522. Doi 10.7868/S2308112017060049.
12. Панин С. В., Корниенко Л. А., Алексенко В. О. [и др.] Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 9. С. 45–51.

13. Брусенцева Т. А., Филиппов А. А., Фомин В. М. Композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и наночастиц // Известия Алтайского государственного университета. 2014. № 1–1(81). С. 25–27. Doi 10.14258/izvasu(2014)1.1-04.

14. Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.

15. Ильина В. Н., Гафарова В. А., Бугай Д. Е. [и др.]. Адгезионная и когезионная прочность композиционного материала с углеродными наполнителями для заделки трещин // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 6. С. 124–133. Doi 10.17122/ngdelo-2021-6-124-133.

16. Ильина В. Н., Гафарова В. А., Ильин С. В. [и др.] Распределение поверхностной энергии на фрагменте газопровода с трещиной в сварном соединении // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 6. С. 109–116. Doi 10.17122/ngdelo-2021-6-109-116.

17. Гафарова В. А., Криони Н. К., Мингажев А. Д. Восстановительный ремонт магистрального трубопровода в процессе его эксплуатации // Пром-Инжиниринг: III междунар. научн.-технич. конф. 16–19 мая 2017 г. Челябинск, 2017. С. 121–125.

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 13.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. Н. Ильина, С. В. Ильин, В. А. Гафарова, И. Р. Кузеев, 2023

УДК 53.086:663.12

*А. А. Каленчук, В. В. Даньшина, В. А. Булашева*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КЛЕТОК МИКРООРГАНИЗМОВ**

**Аннотация.** Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) широко используется в биомедицине и биотехнологии. В работе методом АСМ проведено исследование морфологии поверхности дрожжей штамма *Rhodosporidium diobovatum* – КБП У-5316. Измерены морфометрические параметры клеток. Проведена параметрическая оценка функционального состояния клеточной стенки дрожжей.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, двумерные и трехмерные морфометрические параметры, *Rhodosporidium diobovatum*.

### **I. Введение**

Биообъекты широко используются в промышленных процессах. Жизнедеятельность микроорганизмов зависит от условий среды обитания. В защите от различных стрессоров окружающей среды играют важную роль структура и свойства биологических объектов. Если факторы окружающей среды неблагоприятные, то для адаптации клетки микроорганизмов могут изменять структуру клеточной стенки. Эти изменения можно зафиксировать разными методами. Например, в [1] отмечается, что «отличительным преимуществом зондовой, электронной и конфокальной микроскопии от классических оптических методов является возможность исследования наноструктуры биологических объектов. К примеру, изменения, возникающие в ходе лизиса клеточной стенки дрожжей,

толщина которой составляет ~100–250 нм, невозможно зафиксировать с помощью оптического микроскопа, то же справедливо для образования биопленок на клетках».

Благодаря простой процедуре пробоподготовки и возможности визуализации объектов, атомно-силовая микроскопия (АСМ) активно используется для исследования образцов в биотехнологии [2] и биомедицине [3, 4].

## II. Постановка задачи

Атомно-силовая микроскопия обеспечивает возможность увидеть клетки дрожжей, измерить их морфометрические параметры, провести не только качественный, но и количественный анализ индивидуальных клеток. В связи с этим необходимо находить новые, высокоточные методы оценки структурно-морфологических особенностей клеток биообъектов.

Цель: определить основные морфометрические параметры клеток дрожжей методом атомно-силовой микроскопии для оценки их функциональных свойств.

## III. Теория

Визуально морфология поверхности на разных образцах отличается незначительно, что было как показано авторами [5, 6, 7], так и подтверждено в данном исследовании. Гораздо больше информации можно получить при использовании программного обеспечения, которое позволяет измерять количественные характеристики биологических объектов: линейные размеры, объем и площадь биообъектов, шероховатость поверхности и др.

В литературных источниках [8, 9, 10] рассматриваются три вида морфометрических параметров клеток микроорганизмов, которые оцениваются количественно методом атомно-силовой микроскопии: одномерные, двумерные и трёхмерные.

Одномерные параметры, то есть линейные размеры клеток (длина, ширина, высота), характеризуют изменение клетки только в одном направлении. Двумерные позволяют оценить состояние клетки по двум направлениям (в одной плоскости). К двумерным параметрам относятся: индекс  $I$  (отношение ширины к высоте объекта исследований), коэффициент вытянутости (отношение длины к ширине), коэффициент уширения (отношение площади поперечного сечения к ширине) [8]. Трёхмерные параметры учитывают отклонения значений в трёх направлениях. В качестве трёхмерных параметров используются среднеквадратичная шероховатость поверхности и соотношение площади к объёму [9, 11]. Соотношение площади к объёму пропорционально скорости диффузии через клеточную стенку [10]. Данный параметр характеризует функциональные свойства биологических объектов, а именно избирательную проницаемость клеточной стенки.

## IV. Результаты экспериментов

Методом АСМ исследована морфология поверхности клеток дрожжей двух штаммов. Исследование проводилось на атомно-силовом микроскопе NTEGRA Prima с кремниевым кантилевером NSG10 серии GOLDEN полуконтактным методом при температуре воздуха 23,3°C и относительной влажности 67%. Анализ полученных изображений (рис. 1) проводился с использованием ПО «Gwyddion».

Измерены линейные размеры клеток дрожжей штаммов *Candida Tropicalis* и *Rhodospiridium diobovatum*, подвергнутых различным модификациям, а также клеток *Candida Tropicalis*, выращенных в питательных средах с варьированием концентрации мелассы. Одномерные параметры, такие как длина ( $d$ ) и высота ( $h$ ), представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, анализ одномерных параметров клеток дрожжей малоинформативен. Высота клеток дрожжей изменяется незначительно при разных

условиях. Длина клеток изменяется только в зависимости от вида модификатора. В [7] был сделан аналогичный «вывод о второстепенной возможности использования линейных размеров в качестве критерия для количественной оценки состояния бактериальных клеток в различных условиях существования и формы защиты в ответ на внешнее воздействие».

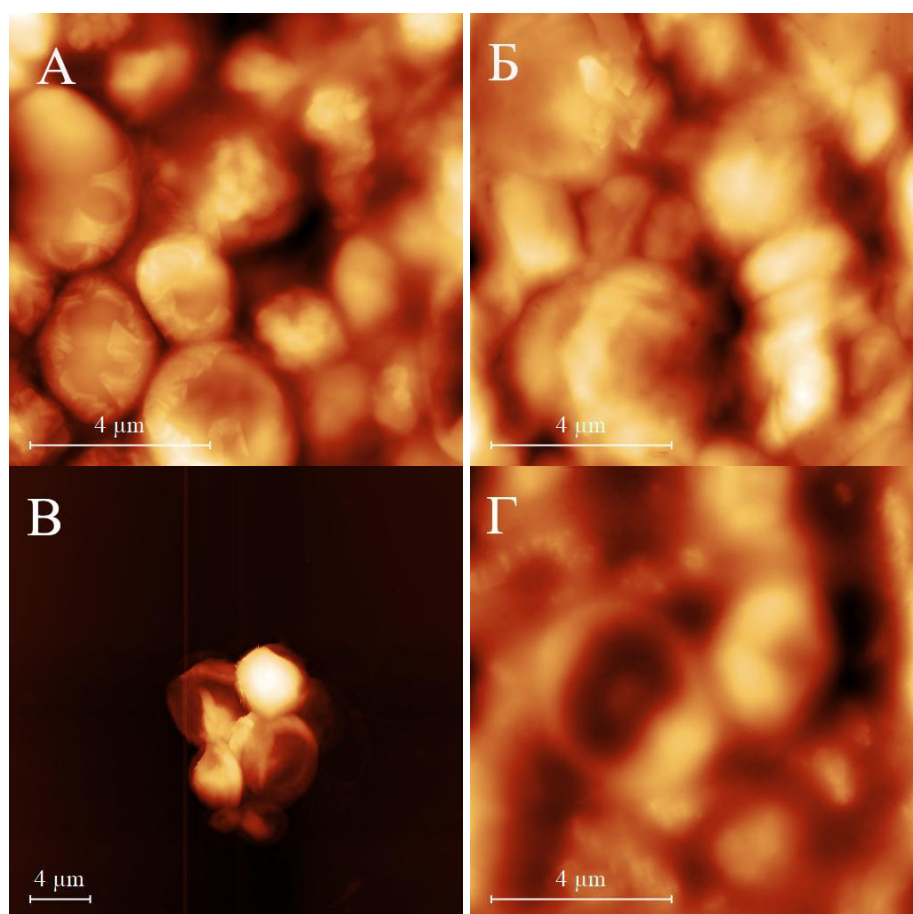


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности клеток дрожжей *Rhodosporidium diobovatum*: А – исходный образец, Б – после модификации перекисью водорода, В – после модификации антибиотиком, Г – после модификации ультрафиолетом

Таблица 1

### Одномерные параметры клеток дрожжей

Параметр р, мкм	<i>Candida Tropicalis</i>							<i>Rhodosporidium diobovatum</i>			
	Конт роль	Модификация			Концентрация мелассы, %			Конт роль	Модификация		
		1	2	3	2	5	8		1	2	3
Б	1,20±0,21	1,26±0,22	1,44±0,33	1,83±0,37	1,50±0,33	1,54±0,35	1,50±0,35	0,91±0,20	1,74±0,20	2,8±0,5	1,32±0,35
д	4,1±0,7	3,8±0,9	3,9±0,6	4,5±0,8	3,37±0,27	3,59±0,32	4,11±0,38	3,78±0,39	2,71±0,34	5,0±0,8	1,6±0,5

Примечание. 1 – после воздействия ультрафиолета, 2 – после воздействия антибиотиком, 3 – после воздействия перекисью водорода.

## V. Обсуждение результатов

Для дрожжей штамма *Rhodospiridium diobovatum* по АСМ-изображениям рассчитаны коэффициент уширения ( $K_1$ ), коэффициент вытянутости ( $K_2$ ), индекс 1 ( $I_1$ ), шероховатость поверхности ( $R_q$ ), соотношение площади к объёму ( $S/V$ ).

Соотношение площади к объёму рассчитывалось по формуле:

$$\frac{S}{V} = \frac{\text{площадь поверхности} + \text{площадь проекции}}{\text{объём}}. \quad (1)$$

Величина  $S/V$ , пропорциональная скорости диффузии, характеризует наноструктурные свойства клеточной стенки дрожжей.

Коэффициенты вытянутости и уширения, индекс 1 позволяют количественно оценить изменение параметров клетки относительно друг друга.

Полученные двумерные и трёхмерные параметры представлены на рис. 2.

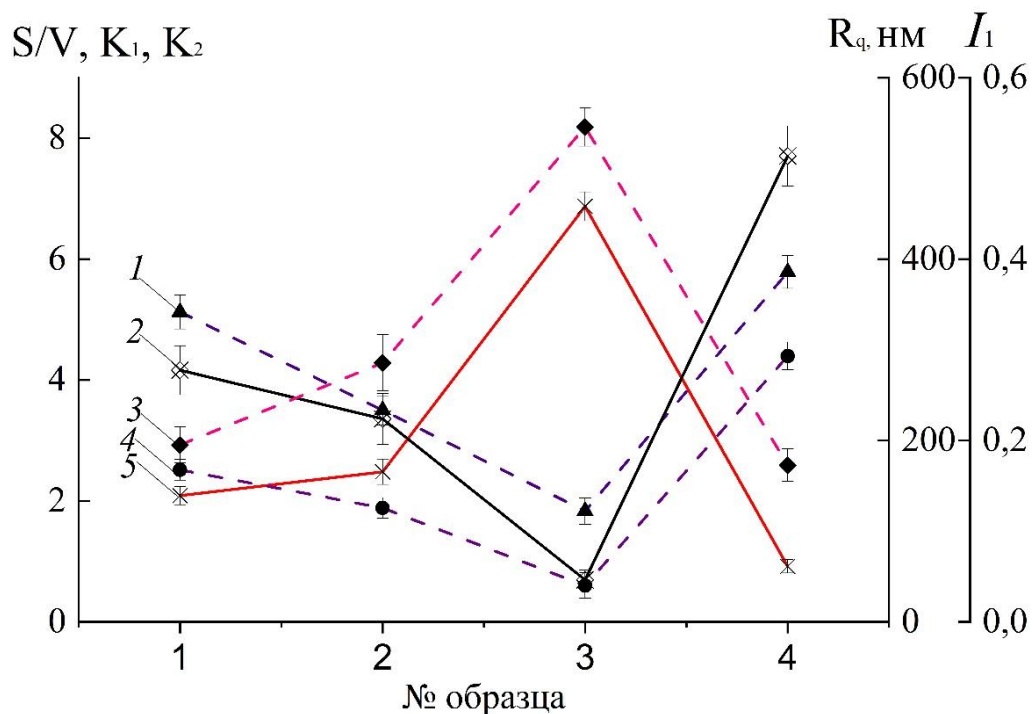


Рис. 2. Зависимость параметров клеток дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* от вида модификации. Образец №1 – исходный образец, образец №2 – после модификации  $H_2O_2$ , образец №3 – после модификации антибиотиком, образец №4 – после модификации ультрафиолетом. 1 – коэффициент вытянутости, 2 – шероховатость, 3 – индекс 1, 4 – коэффициент уширения, 5 –  $S/V$ .

Шероховатость поверхности позволяет количественно оценить микрорельеф поверхности. После модификации антибиотиком поверхность клеток дрожжей приобретает наноразмерную структуру. Совокупность неровностей поверхности уменьшается до 46 нм. При воздействии на клетки дрожжей ультрафиолетовым излучением шероховатость увеличивается в 1,8 раз, что свидетельствует об усложнении структуры поверхности. Как видно из рис. 2, шероховатость поверхности, коэффициенты уширения и вытянутости коррелируют между собой.

Рассчитанные коэффициенты корреляции между двумерными и трехмерными параметрами представлены в таблице 2.



**Коэффициенты корреляции**

	Индекс I	Шероховатость поверхности	Коэффициент уширения	Коэффициент вытянутости
S/V	0,986	-0,898	-0,885	-0,932
Коэффициент уширения	-0,864	0,999	–	0,938
Коэффициент вытянутости	-0,959	0,931	0,938	–
Шероховатость поверхности	-0,870	–	0,999	0,931

Корреляция между шероховатостью поверхности и соотношением площади поверхности к объёму – отрицательная. При изменении структуры поверхности клеток дрожжей скорость диффузии будет изменяться. Максимальная скорость диффузии выявлена в образцах, модифицированных антибиотиком, это объясняется наибольшими повреждениями клеточной стенки.

**VI. Выводы и заключение**

Как показала серия экспериментов, длина и высота клеток дрожжей отличаются незначительно для дрожжей штаммов *Candida Tropicalis* и *Rhodospodium diobovatum*, культивированных в разных условиях или модифицированных. Линейные размеры клеток дрожжей, измеренные методом АСМ, не позволяют оценить функциональные/биологические параметры биологических объектов.

Из анализа литературных источников сформирован оценочный комплекс параметров состояния биообъектов, который наиболее полно описывает не только процесс изменения свойств биологических объектов, но и форму защиты от внешнего воздействия (стрессора).

Для интерпретации экспериментальных данных введены двумерные и трехмерные параметры (коэффициенты): индекс I, коэффициент уширения, коэффициент вытянутости, шероховатость, S/V. Изучено влияние параметров на функциональные свойства и физиологическое состояние клеток дрожжей. Установлена корреляция между двумерными параметрами клеток и избирательной проницаемостью клеточной стенки, обеспечивающая потенциальную возможность экспресс-анализа функционального состояния клеток дрожжей в технологическом процессе.

**Библиографический список**

1. Савин Н. А., Колмогоров В. С., Тимошенко Р. В. [и др.]. Применение нанотехнологий в изучении структуры дрожжей *Candida* // Российские нанотехнологии. 2021. Т. 16, № 4. С. 494–518. Doi:10.1134/S1992722321040105.
2. Francois J. M., Formosa C., Schiavone M. [et al.]. Use of atomic force microscopy (AFM) to explore cell wall properties and response to stress in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* // Curr Genet. 2013. Vol. 59. P. 187–196. Doi:10.1007/s00294-013-0411-0.
3. Шаворост А. С., Воропаев Е. В., Ачинович С. Л., Силян Р. А. Механические свойства поверхности клеток эпителия желудка у пациентов с онкологической патологией // Проблемы здоровья и экологии. 2021. №18 (1). С. 152–159.
4. Яминский И. В., Ахметова А. И. Построение, обработка и анализ трехмерных изображений в биомедицинской сканирующей зондовой микроскопии // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № 7–8. С. 430–433.
5. Камшилов Г. Н., Николаева А. А., Даньшина В. В. [и др.]. Исследование морфологии клеток дрожжей методом сканирующей зондовой микроскопии // Актуальные

проблемы современной науки: материалы VIII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 26 апр. 2019 г. Омск, 2019. С. 37–42.

6. Каленчук А. А., Даньшина В. В., Рогачев Е. А. [и др.]. Исследование целостности клеток *Candida Tropicalis* методом атомно-силовой микроскопии // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника: материалы Регион. молодеж. науч.-практ. конф. 15 апр. 2021 г. Омск, 2021. С. 102–106.

7. Каленчук А. А., Хадыева Я. Р., Даньшина В. В. [и др.]. Влияние концентрации мелассы на динамику роста биомассы // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника: материалы Регион. молодеж. науч.-практ. конф. 21 апр. 2022 г. Омск, 2022. С. 170–174.

8. Ерохин П. С., Осина Н. А., Уткин Д. В. [и др.] Параметрическая оценка состояния бактериальных клеток, исследованных методом атомно-силовой микроскопии // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2020. Т. 16. № 2. С. 66–71.

9. Kuznetsova T., Kulahava T., Zholnerevich I. [et al.] Morphometric characteristics of neutrophils stimulated by adhesion and hypochlorite // Molecular Immunology. 2017. Vol. 87. P. 317–324. Doi:10.1016/j.molimm.2017.05.007.

10. Ivanova L. A., Petrov M. S., Kadushnikov R. M. Determination of Mesophyll Diffusion Resistance in *Chamaerion angustifolium* by the method of three-dimensional reconstruction of the leaf cell packing // Russian Journal of Plant Physiology. 2006. Vol. 53, № 3. P. 316–324. Doi:10.1134/S1021443706030058

11. Плескова С. Н, Горностаева Е. Е., Крюков Р. Н. [и др.] Изменения архитектоники и морфометрических характеристик эритроцитов под воздействием наночастиц магнетита // Цитология. 2017. Т. 59, № 12. С. 874–880.

*Дата поступления статьи: 03.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования 15.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Каленчук, В. В. Даньшина, В. А. Булашева, 2023

УДК 621.793.14

*Е. А. Лахина, Н. Е. Черненко, Д. В. Кириченко, Н. А. Шандыба, С. В. Балакирев,  
М. С. Солодовник*

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

### **ФОРМИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО КАПЕЛЬНОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК**

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов локального травления поверхности GaAs(001) каплями Ga при различных технологических режимах. Впервые на поверхности GaAs с ориентацией (001) получены симметричные нанougлубления пирамидальной формы с низкой поверхностной плотностью ( $\sim 1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ), позволяющие обеспечить дальнейшее формирование в них одиночных квантовых точек для высокоэффективных устройств квантовой фотоники.



**Ключевые слова:** эпитаксия, локальное капельное травление, симметричные квантовые точки.

## I. Введение

Эпитаксиально выращиваемые одиночные квантовые точки (КТ) являются одними из главных кандидатов для использования в качестве источников одиночных и запутанных фотонов благодаря их способности генерировать фотоны по требованию с высокой эффективностью экстракции [1] и близкой к единице неразличимостью [2], а также благодаря универсальности технологии изготовления устройств на их основе [3]. Одной из проблем при создании высококачественных источников поляризационно-запутанных фотонов на основе КТ является то, что зависящий от времени фазовый фактор двухфотонного состояния, индуцированный экситонным расщеплением тонкой структуры (fine structure splitting, FSS), может существенно влиять на степень схожести реальной запутанной пары фотонов с идеальной белловской парой (entanglement fidelity) [4]. Получение высокой степени запутанности требует симметрии потенциала эпитаксиальных КТ для устранения FSS [5], что в свою очередь требует прецизионного управления параметрами массива КТ с высокой структурной симметрией. Так, неоднородность напряжений и удлинение формы КТ зачастую обусловлены анизотропией миграции атомов и взаимодиффузией в процессе роста КТ In(Ga)As/GaAs по широко распространенному методу Странского-Крастанова [6].

На сегодняшний день существует несколько способов формирования высокоэффективных симметричных КТ, в том числе КТ InGaAs в инвертированных пирамидальных углублениях, получаемых жидкостным травлением [7], КТ InAsP в нанопроволоке InP [8], КТ (In)GaAs, формируемые методом высокотемпературной капельной эпитаксии или выращиваемые на высокоиндексных поверхностях [9], а также КТ GaAs/AlGaAs, изготавливаемые *in situ* методом локального капельного травления (ЛКТ) [10], заключающегося в формировании на поверхности капель металла III группы (Ga, In, Al) в отсутствие паров мышьяка по механизму Фольмера-Вебера и последующего травления ими поверхности под действием повышенной температуры и небольшого потока мышьяка [11]. Метод ЛКТ, который позволяет обеспечить ультранизкую плотность КТ без какой-либо литографии и может быть легко интегрирован в технологический процесс выращивания гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии, выгодно отличается среди прочих перечисленных методик и к настоящему времени демонстрирует наилучшие характеристики КТ, получаемых на его основе. Недавние исследования продемонстрировали беспрецедентно высокие уровни запутанности и неразличимости фотонных пар [12], а также телепортацию [13] и обмен запутанностью [14], генерируемый в наноструктурах GaAs/AlGaAs, изготовленных с помощью ЛКТ. Развитие метода ЛКТ в последние годы позволило значительно улучшить понимание механизмов формирования капель и последующего травления ими нижележащей поверхности, а также достичь требуемых параметров массивов углублений, в том числе ультранизкой плотности, позволяющей в дальнейшем получить массив обособленных одиночных КТ [15]. Однако, как показывает анализ литературных данных, до сих пор отсутствуют сообщения о формировании методом ЛКТ на технологически важных поверхностях GaAs с ориентацией (001) низкоплотных симметричных наноглублений с пирамидальной огранкой, которые отличаются единичным отношением продольного диаметра к поперечному, а также большой глубиной, позволяющей обеспечить хорошую локализацию в них квантовых точек.

## II. Постановка задачи

Целью данной работы является исследование технологических режимов капельного травления Ga/GaAs (001), позволяющих получить симметричные наноглубления

пирамидальной формы плотностью порядка  $1 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ . Для достижения поставленной цели необходимо учитывать ряд параметров, влияющих на механизмы формирования капель и последующего травления поверхности: температура подложки, количество осажденного материала, температура и время отжига образца, давление паров мышьяка и др.

### III. Описание эксперимента

Экспериментальные исследования проводились в установке молекулярно-лучевой эпитаксии SemiTEq STE35 с твердотельными источниками материалов на “epi-ready” подложках GaAs (001). На первом этапе проводился стандартный сгон окисла в потоке мышьяка при температуре  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , после чего выращивался буферный слой GaAs толщиной 250 нм. Далее поток мышьяка перекрывался с помощью вентиля с целью снижения фонового давления в камере роста (до различных значений в диапазоне от  $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$  до  $3,5 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$ ) для обеспечения формирования на поверхности капель металла. Затем проводилось осаждение атомов Ga с эквивалентной скоростью 0,1 монослоя (МС) в секунду в течение времени, соответствующего различному количеству осажденного материала от 1,1 до 5 МС, при различных температурах подложки в диапазоне от  $400$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . На следующем этапе происходил отжиг подложки до  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $580 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $610 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 15 и 30 минут. После отжига образцы охлаждались и выгружались из камеры для дальнейшего исследования в атомно-силовом (АСМ) и растровом электронном микроскопах (РЭМ).

### IV. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены АСМ-изображения массивов углублений, полученных после травления каплями, сформированными после осаждения различного количества Ga при температуре  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что 1,1 МС материала Ga недостаточно для получения капель, способных обеспечить формирование глубоких наноразмерных участков поверхности путем травления. При этом в остальных случаях наблюдаются массивы углублений с различным средним диаметром, увеличивающимся по мере увеличения количества осажденного материала. Глубина сформированных углублений, согласно АСМ-измерениям, увеличивается от 1,6 нм для 2 МС до 5,3 нм для 5 МС Ga, что связано с увеличением объема капель, являющихся источником атомов, вытесняющих нижележащий материал в процессе травления [16]. Поверхностная плотность углублений для указанных образцов находится в диапазоне от  $4 \cdot 10^{-7}$  до  $9 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2}$  и удовлетворяет заданному требованию, при котором среднее расстояние между углублениями составляет около 1 мкм. Поверхностная плотность оценивалась как отношение количества углублений, обнаруженных на АСМ-изображении, к площади АСМ-скана  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ .

Как было показано в предыдущих исследованиях, для повышения вероятности зарождения островков в углублениях и, соответственно, увеличения степени селективности роста КТ они должны обладать как можно большей глубиной, не превышающей при этом 40 нм [17]. В связи с этим в качестве предпочтительного количества осажденного материала Ga для дальнейших исследований было выбрано значение 5 МС.

На следующем этапе было проведено исследование времени выдержки между этапами осаждения материала капель и последующего нагрева подложки до температуры отжига. Установлено, что увеличение времени выдержки от 1 до 15 минут позволяет снизить среднеквадратическое отклонение среднего диаметра углублений с 12 до 5%, что связано с перераспределением материала в процессе оствальдского созревания [18] и увеличения однородности капель непосредственно перед началом травления.

Увеличение температуры отжига от  $580 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $610 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к снижению глубины углублений с 4,3 до 1,0 нм и увеличению их среднего диаметра от 103 до 159 нм (рис. 2).

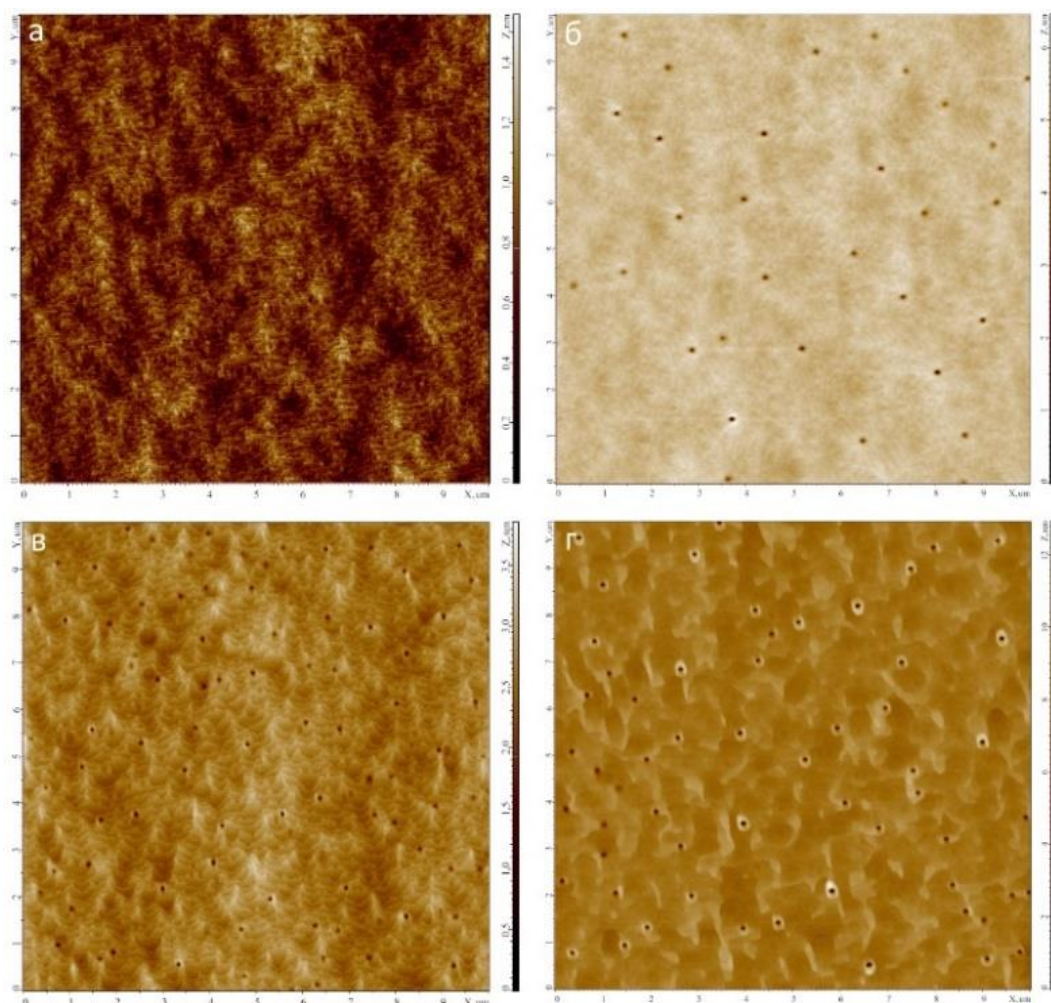


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности GaAs после травления каплями, сформированными после осаждения различного количества Ga: а) 1,1 мс, б) 1,5 мс, в) 2,0 мс, г) 5,0 мс

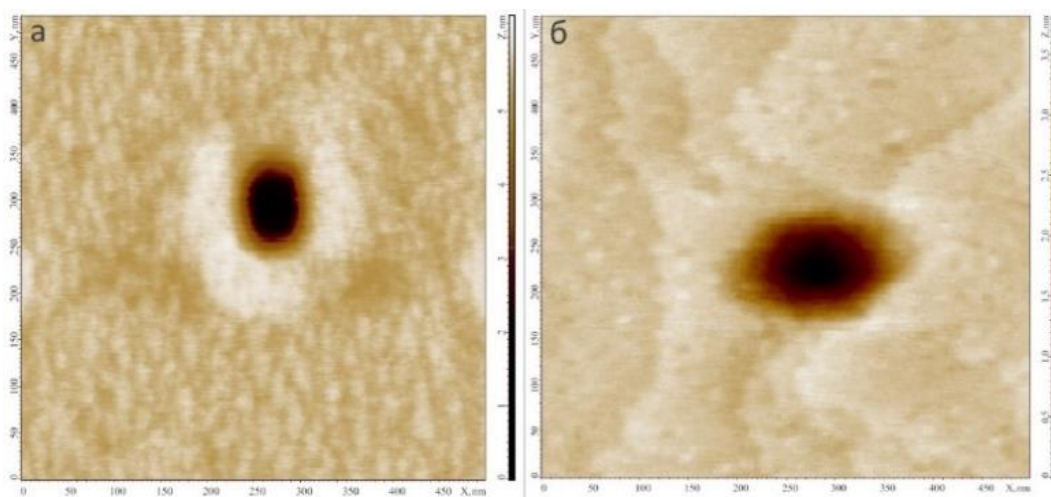


Рис. 2. АСМ-изображения наноглублений, полученных после ЛКТ при различной температуре отжига: а) 580 °С, б) 610 °С

Несмотря на удаление характерного ободка, образующегося в результате кристаллизации капли в потоке мышьяка на границе тройной точки, снижение глубины и увеличение диаметра углублений снижают привлекательность использования сформированных при  $T = 610\text{ °C}$  углублений из-за снижения вероятности зарождения в них

островков либо потенциальной инициации полицентрического зарождения, наблюдаемого в углублениях с большим диаметром.

Симметричные пирамидальные углубления с требуемой поверхностной плотностью были получены при снижении фонового давления мышьяка до значений ниже  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Па при температуре отжига  $550^\circ\text{C}$  и различном времени отжига от 15 до 30 минут. На рис. 3 представлены АСМ- и РЭМ-изображения полученных образцов, а также профилограмма типичного наноглубления для двух взаимно перпендикулярных направлений.

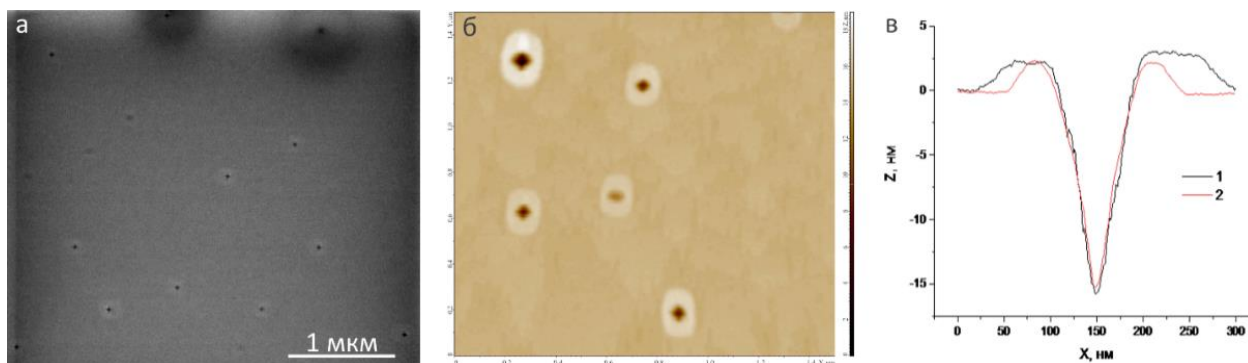


Рис. 3. Изображение поверхности GaAs после травления каплями Ga при давлении мышьяка  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Па и различном времени отжига: а) 30 мин (РЭМ), б) 15 минут (АСМ), в) АСМ-профилограмма углубления, представленного на рис. 3б

Как видно на рис. 3в, характерное углубление для полученных образцов имеет боковые стенки в виде плоских граней и одинаковую форму и размер в различных латеральных направлениях. Для углубления характерно наличие протяженного ободка высотой 2 нм, имеющего анизотропную форму, обусловленную различием в коэффициентах поверхностной диффузии в зависимости от направления. Однако глубина углубления при этом достигает 15 нм, что положительно сказывается на дальнейшей локализации в нем эпитаксиальной наноструктуры.

## V. Выводы и заключение

Таким образом, в результате анализа проведенных исследований выявлено, что пирамидальные наноглубления для последующей локализации в них высокосимметричных КТ могут быть получены на поверхности GaAs(001) посредством локального травления каплями Ga при низком фоновом давлении мышьяка (не выше  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Па) и температуре отжига  $550^\circ\text{C}$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–79–10251, <https://rscf.ru/project/22-79-10251/>, в Южном федеральном университете.

## Библиографический список

1. Vajner D. A., Rickert L., Gao T. [et al.]. Quantum Communication Using Semiconductor Quantum Dots // *Advanced Quantum Technologies*. 2022. Vol. 5, № 7. P. 2100116. Doi:10.1002/qute.202100116.
2. Da Lio B., Faurby C., Zhou X. [et al.]. A Pure and Indistinguishable Single-Photon Source at Telecommunication Wavelength // *Advanced Quantum Technologies*. 2022. Vol. 5, № 5. P. 2200006. Doi:10.1002/qute.202200006.
3. Tonndorf P., Del Pozo-Zamudio O., Gruhler N. [et al.]. On-Chip Waveguide Coupling of a Layered Semiconductor Single-Photon Source // *Nano Letters*. 2017. Vol. 17, № 9. P. 5446–5451. Doi:10.1021/acs.nanolett.7b02092.
4. Singh R., Bester G. Nanowire Quantum Dots as an Ideal Source of Entangled Photon

Pairs // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103, № 6. P. 063601. Doi:10.1103/PhysRevLett.103.063601.

5. Juska G. Dimastrodonato V., Mereni L. [et al.]. Towards quantum-dot arrays of entangled photon emitters // Nature Photonics. 2013. Vol. 7, № 7. P. 527–531. Doi:10.1038/nphoton.2013.128.

6. Baolai Liang, Qing Yuan, Linlin Su. [et al.]. Correlation between photoluminescence and morphology for single layer self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots // Optics Express. 2018. Vol. 26, № 18. P. 23107–23118. Doi:10.1364/OE.26.023107.

7. Chung T.H., Juska G., Moroni S. [et al.]. Selective carrier injection into patterned arrays of pyramidal quantum dots for entangled photon light-emitting diodes // Nature Photonics. 2016. Vol. 10, № 12. P. 782–787. Doi:10.1038/nphoton.2016.203.

8. Versteegh M. A. M., Reimer M., Jöns K. [et al.]. Observation of strongly entangled photon pairs from a nanowire quantum dot // Nature Communications. 2014. Vol. 5, № 1. P. 5298. Doi:10.1038/ncomms6298.

9. Basso Basset F., Bietti S., Reindl M. [et al.]. High-Yield Fabrication of Entangled Photon Emitters for Hybrid Quantum Networking Using High-Temperature Droplet Epitaxy // Nano Letters. 2018. Vol. 18, № 1. P. 505–512. Doi:10.1021/acs.nanolett.7b04472.

10. Huo Y. H., Křápek V., Rastelli A. [et al.]. Volume dependence of excitonic fine structure splitting in geometrically similar quantum dots // Physical Review B. 2014. Vol. 90, № 4. P. 041304. Doi: 10.1103/PhysRevB.90.041304.

11. Heyn C., Bartsch T., Sanguinetti S. [et al.]. Dynamics of mass transport during nanohole drilling by local droplet etching // Nanoscale Research Letters. 2015. Vol. 10, № 1. P. 67. Doi:10.1186/s11671-015-0779-5.

12. Liu J., Su R., Wei Y. [et al.]. A solid-state source of strongly entangled photon pairs with high brightness and indistinguishability // Nature Nanotechnology. 2019. Vol. 14, № 6. P. 586–593. Doi: 10.1038/s41565-019-0435-9.

13. Reindl M., Huber D., Schimpf C. [et al.]. All-photonic quantum teleportation using on-demand solid-state quantum emitters // Science Advances. 2018. Vol. 4, № 12. Doi:10.1126/sciadv.aau1255.

14. Zopf M., Keil R., Chen Y. [et al.]. Entanglement Swapping with Semiconductor-Generated Photons Violates Bell's Inequality // Physical Review Letters. 2019. Vol. 123, № 16. P. 160502. Doi:10.1103/PhysRevLett.123.160502.

15. Heyn C., Feddersen S. Modeling of al and ga droplet nucleation during droplet epitaxy or droplet etching // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 2. P. 1–13. Doi:10.3390/nano11020468.

16. Heyn C., Stemmann A., Klingbeil M. [et al.]. Mechanism and applications of local droplet etching // Journal of Crystal Growth. 2011. Vol. 323, № 1. P. 263–266. Doi:10.1016/j.jcrysgro.2010.10.141.

17. Heyn C., Zocher M., Pudewill L. [et al.]. Droplet etched GaAs quantum dots close to surfaces and metallic interfaces // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121, № 4. P. 044306. Doi:10.1063/1.4974965.

18. Ostwald W. Lehrbuch der Allgemeinen Chemie. Leipzig: Engelmann, 1896. Vol. 2. 934 p.

*Дата поступления статьи: 31.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 13.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. А. Лахина, Н. Е. Черненко, Д. В. Кириченко, Н. А. Шандыба, С. В. Балакирев, М. С. Солодовник, 2023



## ЭЛЕКТРОННЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЛЕНТЫ $\text{MoS}_2$

**Аннотация.** В работе в рамках теории функционала плотности с использованием псевдопотенциального подхода в пакете Quantum Espresso исследуются электронные и диэлектрические свойства наноленты  $\text{MoS}_2$ . Рассчитаны зонная структура и действительные и мнимые части комплексных диэлектрических функций.

**Ключевые слова:** нанолента  $\text{MoS}_2$ , электронные свойства, оптические свойства, тонкий слой, регулирование свойств.

### I. Введение

Наряду с графеном дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) в последнее время привлекают повышенное внимание исследователей благодаря широкому потенциалу применения в электронной, оптоэлектронной, термоэлектрической, спинтронной и каталитической областях [1–5]. ДПМ (в форме  $\text{MX}_2$ , где  $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$ ;  $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) отличаются новыми физическими свойствами, такими как собственная ширина запрещенной зоны, сильная спин-орбитальная связь, экситонные эффекты и пьезоэлектрические свойства [6–10].

Двумерный слой дихалькогенида молибдена может сохранять свои физические свойства, когда его размер велик. Однако небольшая чешуйка или лента могут проявлять весьма разные электронные и магнитные свойства. В частности, краевые атомы могут влиять на физические свойства. Пассивирование краевых атомов атомами водорода также приводит к существенным изменениям свойств нанолент. В связи с этим можно ожидать, что наноленты могут проявлять еще более интересные электронные и оптические свойства.

Наноленты ДПМ широко изучались теоретически и экспериментально как многообещающие альтернативы наноустройствам следующего поколения [11]. В зависимости от конкретных окончаний краев наноленты можно разделить на зигзагообразные и «кресельные» с разными краевыми модами и физическими свойствами. Например, зигзагообразные наноленты  $\text{MoS}_2$  представляют собой магнитные металлы, в то время как наноленты  $\text{MoS}_2$  типа «кресло» обладают немагнитными и полупроводниковыми характеристиками [12].

В этой работе мы исследуем электронные и оптические свойства наноленты дихалькогенида молибдена, пассивированной атомами водорода.

### II. Методика расчета

Все расчеты выполнены в рамках теории функционала плотности с использованием псевдопотенциального подхода в пакете Quantum Espresso [13–15]. Для описания взаимодействия между ионами и электронами в Quantum Espresso реализован метод псевдопотенциалов, который позволяет повысить эффективность расчетов за счет сглаживания быстро осциллирующих волновых функций электронов вблизи атомных ядер. В разложении волновой функции были учтены плоские волны с энергией до  $60 \text{ Ry}$ , которые обеспечивают хорошую сходимость полной энергии. Для учета взаимодействия между ионными ядрами и валентными электронами используется модель псевдопотенциалов фон Варта-Кара (Von Barth-Cara, VBC) в приближении локальной плотности (LDA – Local Density Approximation). Равновесная структура определена минимизацией полной энергии относительно параметров решетки, а внутренние параметры структуры оптимизированы с

помощью сил Гельмана–Фейнмана. Процесс минимизации осуществлялся до тех пор, пока остаточные силы на атомах не станут ниже  $0,003 \text{ эВ/\text{Å}}$ . Важно упомянуть, что определение точной ионной и решеточной релаксации существенно для корректных вычислений динамики решетки. Кроме того, чтобы минимизировать взаимодействия между двумя соседними слоями дихалькогенида молибдена, в расчетах сохраняется вакуумное расстояние  $15 \text{ \AA}$ . Для обеспечения достаточной точности взят набор k-точек  $13 \times 1 \times 1$  в зоне Бриллюэна исследуемой суперячейки согласно схеме Монхорста–Пака.

### III. Результаты и обсуждение

Чтобы представить результаты, полученные в расчетах, мы используем общепринятую классификацию нанолент графена. Обычно наноленты типа «кресло» и «зигзаг» обозначаются как N-AGNR (arm-chair graphene nanoribbon) и N-ZGNR (zig-zag graphene nanoribbon) соответственно, где индекс N относится к ширине наноленты и принимает целочисленные значения. В настоящей работе изучаются наноленты дихалькогенида молибдена типа «кресло» с шириной, соответствующей индексам  $N=5$ ,  $N=7$  и  $N=9$  (5-AMoS<sub>2</sub>NR, 7-AMoS<sub>2</sub>NR и 9-AMoS<sub>2</sub>R), пассивированные атомами водорода (рис. 1). Оборванные связи на краях ленты насыщают (пассивируют) атомами водорода, тем самым стабилизируя ленту.

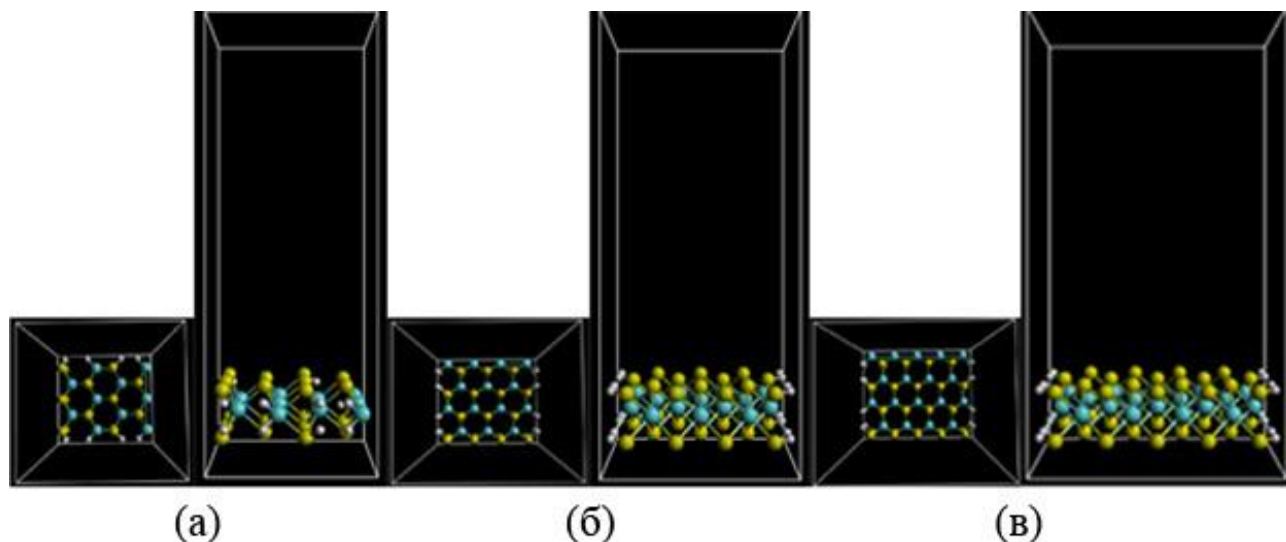


Рис. 1. (а) 5-AMoS<sub>2</sub>NR, (б) 7-AMoS<sub>2</sub>NR (в) 9-AMoS<sub>2</sub>NR – вид сверху и сбоку

На рис. 2 показана зонная структура нанолент 5-AMoS<sub>2</sub>NR, 7-AMoS<sub>2</sub>NR и 9-AMoS<sub>2</sub>R.

Подобно однослойному MoS<sub>2</sub>, наноленты типа "кресло" (AMoS<sub>2</sub>NR) также являются полупроводниками. Кресловидная нанолента дихалькогенида молибдена представляет собой немагнитный полупроводник с прямой запрещенной зоной. При обрыве краев и пассивации атомами водорода ширина запрещенной зоны увеличивается. Кроме того, ширина запрещенной зоны изменяется в зависимости от N, как и поведение семейства графеновых нанолент. Для узких нанолент типа «кресло» с  $N < 7$  расчетное значение ширины запрещенной зоны больше, чем для широких нанолент, из-за эффекта квантового ограничения.

Оптические свойства любого материала обычно определяются диэлектрической проницаемостью системы. Здесь мы используем суперпозицию осцилляторов Лоренца для моделирования комплексной диэлектрической функции гетероструктуры,  $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ , которая является функцией энергии фотона. Вообще говоря, диэлектрическая проницаемость представляет собой действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1(\omega)$ . Эта часть диэлектрической проницаемости



обусловлена различными видами поляризации смещения внутри материала и дает нам информацию о запасенной в материале энергии при помещении его во внешнее электрическое поле. Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2(\omega)$  называется коэффициентом потерь и является мерой потерь энергии или того, как сильно материал поглощает энергию внешнего электрического поля.

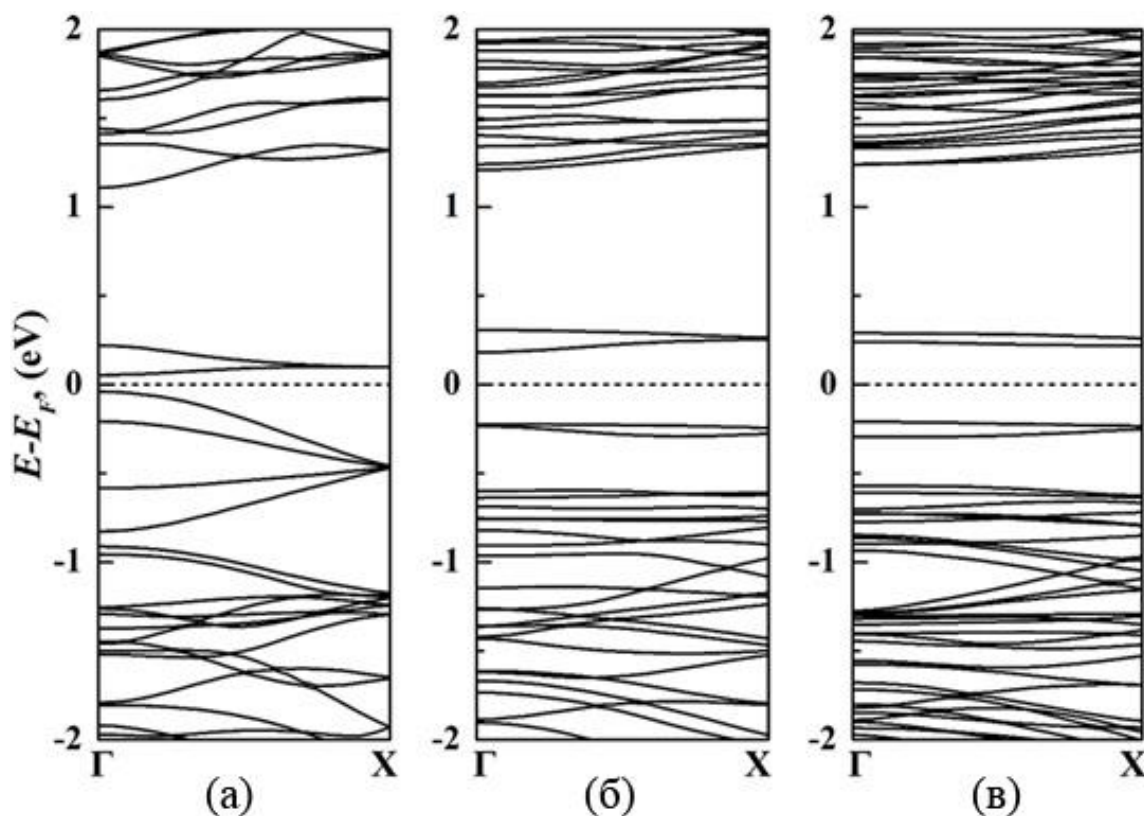


Рис. 2. Зонные структуры нанолент 5-AMoS<sub>2</sub>NR (а), 7-AMoS<sub>2</sub>NR (б) и 9-AMoS<sub>2</sub>NR (в)

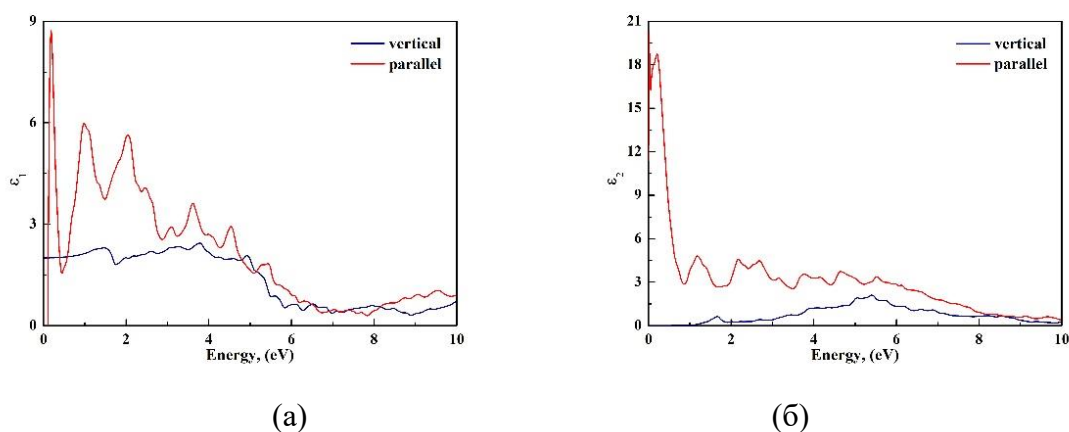


Рис. 3. Комплексная диэлектрическая проницаемость наноленты 5-AMoS<sub>2</sub>NR; (а) – параллельная и вертикальная составляющие действительной части диэлектрической проницаемости, (б) – параллельная и вертикальная составляющие мнимой части диэлектрической проницаемости

На рис. 3 показаны рассчитанные диэлектрические проницаемости  $\epsilon$  наноленты 5-AMoS<sub>2</sub>NR. На рис. 3а показаны параллельная и вертикальная составляющие действительной

части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\omega)$ . На рис. 3б параллельная и вертикальная составляющие мнимой части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\omega)$ .

#### IV. Заключение

В этой работе мы рассчитали электронные зонные структуры нанолент 5-AMoS<sub>2</sub>NR, 7-AMoS<sub>2</sub>NR и 9-AMoS<sub>2</sub>NR. Обнаружено, что с увеличением ширины ленты увеличивается и ширина запрещенной зоны этих нанолент. Проведен квантовомеханический расчет комплексной диэлектрической проницаемости наноленты 5-AMoS<sub>2</sub>NR. Из рис. 3 видно, что параллельные и вертикальные составляющие  $\varepsilon(\omega)$  сильно отличаются. Это может говорить о том, что нанолента 5-AMoS<sub>2</sub>NR является анизотропным материалом. Наноленты дихалькогенидов молибдена можно использовать в различных оптических приложениях.

Научный руководитель Шарин Егор Петрович, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова.

#### Библиографический список

1. Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J, [et al.]. Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors // Nature nanotechnology. 2011. Vol. 6. P. 147–150.
2. Sun Z., Martinez A., Wang F. Optical modulators with 2D layered materials // Nature Photonics. 2016. Vol. 10. P. 227–238.
3. Lee C., Hong J., Whangbo M-H. [et al.]. Enhancing the thermoelectric properties of layered transition-metal dichalcogenides 2H-MQ<sub>2</sub> (M= Mo, W; Q= S, Se, Te) by layer mixing: density functional investigation // Chemistry of Materials. 2013. Vol. 25. P. 3745–3752.
4. Xu X. Yao W., Xiao D. [et al.]. Spin and pseudospins in layered transition metal dichalcogenides // Nature Physics. 2014. Vol. 10. P. 343–350.
5. Voiry D., Yang J., Chhowalla M. Recent strategies for improving the catalytic activity of 2D TMD nanosheets toward the hydrogen evolution reaction // Advanced materials. 2016. Vol. 28. P. 6197–6206.
6. Zhang Y., Chang T.R., Zhou B. [et al.]. Direct observation of the transition from indirect to direct bandgap in atomically thin epitaxial MoSe<sub>2</sub> // Nature nanotechnology. 2014. Vol. 9. P. 111–115.
7. Liu G. B. Shan W-Y., Yao Y. [et al.]. Three-band tight-binding model for monolayers of group-VIB transition metal dichalcogenides // Physical Review B. 2013. Vol. 88. P. 085433.
8. Ugeda M. M. Bradley A. J., Shi S. F. [et al.]. Giant bandgap renormalization and excitonic effects in a monolayer transition metal dichalcogenide semiconductor // Nature materials. 2014. Vol. 13. P. 1091–1095.
9. Van der Donck M., Zarenia M., Peeters F. M. Excitons, trions, and biexcitons in transition-metal dichalcogenides: magnetic-field dependence // Physical Review B. 2018. Vol. 97. P. 195408.
10. Blonsky M. N., Zhuang H. L., Singh A. K. [et al.]. Ab initio prediction of piezoelectricity in two-dimensional materials // ACS nano. 2015. Vol. 9. P. 9885–9891.
11. Xia Y. Yang P., Sun Y. [et al.]. One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications // Advanced materials. 2003. Vol. 15. P. 353–389.
12. Dolui K., Pemmaraju C. D., Sanvito S. Electric field effects on armchair MoS<sub>2</sub> nanoribbons // ACS nano. 2012. Vol. 6. P. 4823–4834.
13. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N. [et al.]. Quantum ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials // J. Phys.:Condens. Matter. 2009. Vol. 21. P. 399502.
14. Giannozzi P., Andreussi O., Brumme T. [et al.]. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO // J. Phys.:Condens. Matter. 2017. Vol. 29. P. 465901.

15. Giannozzi P., Baseggio O., Bonfa P. [et al.]. Quantum ESPRESSO toward the exascale // J. Chem. Phys. 2020. Vol. 152. P. 154105.

*Дата поступления статьи: 29.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 28.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© П. Г. Павлов, 2023

УДК 665.939.14:681.785.574

*Д. А. Ставров*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Аннотация.** В современном мире производство белка востребовано в пищевой промышленности из-за изменения потребительских предпочтений и роста населения, поэтому вместо традиционных источников белка все чаще используют растительные белки. Актуальной проблемой в производстве растительных белков является идентификация продуктов в технологическом процессе. В работе методом ИК-Фурье спектроскопии проанализированы спектры шрота и продукта его гидролиза, выявлено наличие полос поглощения, характерных для наночастиц растительного белка.

**Ключевые слова:** ИК-Фурье спектроскопия; шрот подсолнечника; растительный белок.

### **I. Введение**

Производство белка становится более востребованным в сфере пищевого производства, так как изменение потребительских предпочтений и рост населения требуют увеличения объемов производства белка. Традиционные источники белка, такие как мясо и рыба, имеют ограничения в производстве, в то время как растительные белки могут служить дополнением или потенциальной заменой [1]. Одним из источников растительного белка является шрот подсолнечника – продукт переработки семян подсолнечника, который имеет потенциал использования в пищевой промышленности. Однако, чтобы извлечь максимальное количество белка из шрота, требуется дополнительный этап обработки. Например, гидролиз шрота подсолнечника [2], который обеспечивает возможность выделения из него растительных белков, обладающих более высокой питательной ценностью по сравнению с исходным продуктом. Гидролиз осуществляется путем разложения сложных органических соединений на более простые. Результатом гидролиза шрота подсолнечника являются продукты, которые отличаются по качеству питательных веществ. По этой причине идентификация продукта гидролиза является важным этапом контроля качества продуктов питания, что обеспечивает безопасность их потребления.

### **II. Постановка задачи**

Для идентификации продукта гидролиза шрота предлагается использовать метод ИК-Фурье спектроскопии, который отличается высокой скоростью и может быть применен на производстве для контроля качества.

Цель работы: идентифицировать продукт, полученный гидролизом шрота подсолнечника.

### III. Теория

Наноструктурные элементы белков определяют методом ИК-Фурье спектроскопии, т.к. он позволяет быстро и достаточно точно идентифицировать функциональные группы исследуемого вещества.

В [3] изучались изменения в конформации изолятов белка шрота подсолнечника после обработки ультразвуком. По результатам замечено, что ультразвуковая обработка увеличивает интенсивность пика Амид I.

В работе [4] авторы идентифицируют структуру шрота кокоса и его белковых фракций по пикам амидов А, В, I, II, III с помощью ИК-Фурье спектроскопии, а в [5] проводят идентификацию пшеничных отрубей и соевой муки методом ИК-Фурье спектроскопии, в [6] – изменения гидрофобности и взаимодействия молекул молочной кислоты с белком сои в пленках на основе соевого белка и его модифицированных аналогов.

Авторы [7] изучали влияние обратных мицелл диэтилгексилфталата, сульфосукцината натрия на конформацию глобулинов 7S и 11S с помощью ИК-Фурье спектроскопии. Изменения идентифицировали по интенсивности пиков в амидах I, II и III.

ИК-Фурье спектроскопию применяют также [8] для исследования связи между гидрофобностью поверхности и вторичной структуры в разных типах изолята белка. Результаты показывают, что гидрофобность поверхности повышается с уменьшением содержания  $\alpha$ -спирали, а снижается с увеличением содержания  $\beta$ -листа и случайной катушки. Нет значительной связи между  $\beta$ -поворотом и гидрофобностью поверхности. Вторичная структура отображалась следующими пиками: 1610–1640  $\text{см}^{-1}$  для  $\beta$ -листа; 1640–1650  $\text{см}^{-1}$  для случайной катушки; 1650–1658  $\text{см}^{-1}$  для  $\alpha$ -спирали; 1660–1700  $\text{см}^{-1}$  для  $\beta$ -поворота.

### IV. Методика и результаты

Объектом исследования в рамках данной работы является шрот подсолнечника (Белгородская обл.) и продукт, полученный из него гидролизом.

Идентификация объектов исследования проводилась методом ИК-Фурье спектроскопии. Спектры всех образцов были получены с помощью ИК Фурье-спектрометра ФТ-801 (Симекс, Новосибирск, Россия) в области 4000–500  $\text{см}^{-1}$  при комнатной температуре и спектральном разрешении 4  $\text{см}^{-1}$ , 16 сканов. Спектры снимали в таблетке KBr (исходный образец был смешан и спрессован с бромидом калия в таблетку).

В таблице 1 представлена интерпретация основных изменений в ИК-спектрах шрота.

Таблица 1

**Сравнение отнесений полос поглощения исследуемых образцов с полосами поглощения белка (рис. 1, спектры 1, 2)**

Характеристические частоты, $\text{см}^{-1}$			Интерпретация	Источник
Образец 1	Образец 2	Белок [9]		
3100	3275	3290	(N-H)st, (O-H)st	[10] [9]
-	-	3080	(CH <sub>2</sub> )st	[9]
-	2961	2960	(CH <sub>2</sub> )stas	[10] [9]
2929	2930	-	CH=O st	[10]
1684	1659	1640	Амид I (C=O)st	[10] [9]
1541	1534	1535	Амид II (NH) $\delta$	[10] [9]
-	1447	1450	C-H $\delta$	[9]
1396	1400	1400	Амид III (N-H) $\delta$	[10] [9]
-	1240	1240	C-N $\delta$	[9]

Примечание: st – валентные колебания,  $\delta$  – деформационные колебания, stas – валентно-асимметричные колебания.

В спектре белков [3, 4, 9, 10] характеристическими являются три инфракрасные полосы, соответствующие колебательным переходам в пептидном остове ( $\text{—NH—CH—OC—}$ ): полосы, связанные с растяжением связи N-H (около  $3300\text{ см}^{-1}$ ), растяжением связи C=O ( $1640\text{--}1660\text{ см}^{-1}$ , полоса амид I) и деформацией связи N-H ( $1520\text{--}1550\text{ см}^{-1}$ , полоса амид II). При формировании вторичной структуры белка энергии этих трех пептидных колебаний меняются и приводят к сдвигу полос в ИК спектре. В спектре 2 первая полоса, отвечающая валентным колебаниям ( $3275\text{ см}^{-1}$ ), смещается в область более низких энергий, т.к. водородная связь облегчает смещение атома азота амидной группы и атома кислорода карбонильной группы в направлении акцептора или донора протона соответственно.

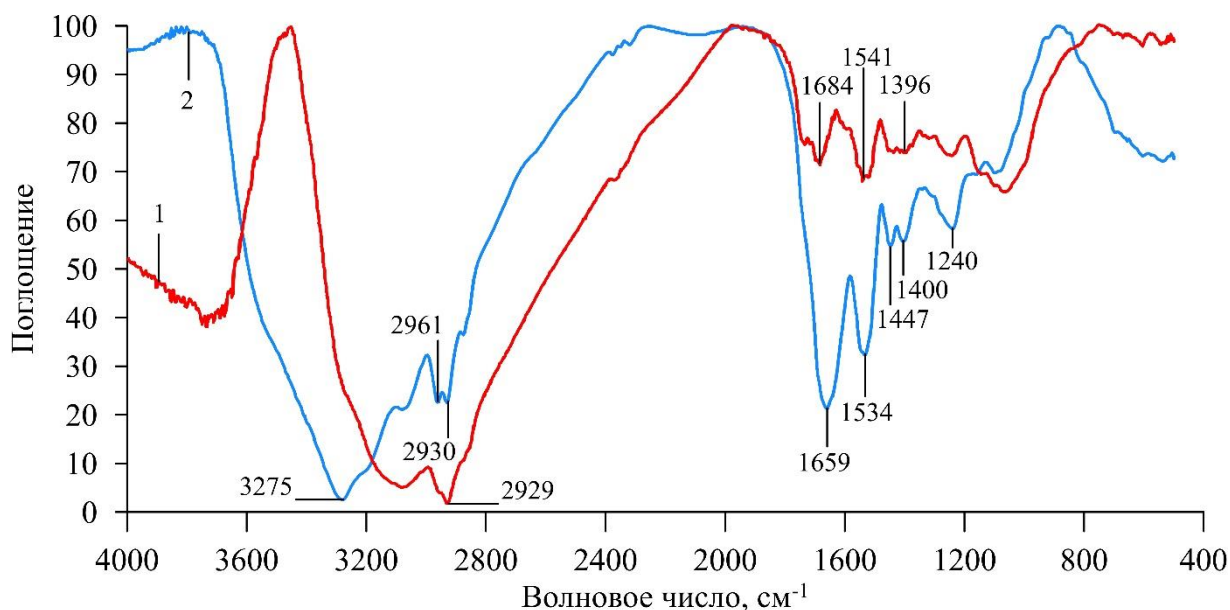


Рис. 1. ИК-Фурье спектр шрота подсолнечника до (1) и после гидролиза (2)

Полосы амид I ( $1659\text{ см}^{-1}$  для спектра 1,  $1684\text{ см}^{-1}$  — для шрота) и амид II ( $1534\text{ см}^{-1}$  спектр 1,  $1520\text{ см}^{-1}$  — шрот) располагаются в интервале частот, отмеченных в литературных источниках и спектральных таблицах. Сопоставление их интенсивности показывает, что в продукте гидролиза содержится существенно больше белковых компонентов, чем в шроте [11].

Полоса  $2961\text{ см}^{-1}$  в 1 спектре относится к колебаниям растяжения и изгиба  $\text{—CH}$  групп. Она смещена в сторону более высоких энергий, так как водородная связь препятствует изгибанию связи C-H. Деформационные колебания этих же групп служат источником поглощения в области  $1447\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ .

В спектре шрота полоса  $2929\text{ см}^{-1}$  отнесена к валентным асимметричным и симметричным колебаниям  $\text{—CH}_n$ -групп, которые содержатся в алифатической цепи липидных и полисахаридных наноструктурных элементов. Интенсивность полос соответствует содержанию липидов в образце. Аналогичные полосы были обнаружены в кокосе [4].

Т.к. шрот состоит из клетчатки и белка, то только в его спектре проявляется широкая интенсивная полоса в области  $3000\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ , являющаяся результатом наложения полос валентных колебаний групп O-H из клетчатки и N-H ( $\text{NH}^{3+}$ ) из белка.

Полосы в области  $1400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$  связаны с колебаниями C—O—N группы. Полосы, относящиеся к валентным колебаниям C—C, малоинтенсивны и проявляются в широком интервале в области  $1200\text{--}800\text{ см}^{-1}$ ; как правило, они не имеют существенного значения для установления структуры молекул. Таким образом, в спектре шрота подсолнечника выявлены наноструктурные элементы клетчатки, белка и масла. В спектре 2 отмечаются полосы,

аналогичные полосам белкового экстракта подсолнечника [9] и соевых белков [7]. А т.к. наиболее сильные полосы относятся к колебаниям пептидного остова, то можно с уверенностью сказать, что исследуемым веществом является белок шрота подсолнечника.

## **V. Выводы**

Определен качественный состав наноструктурных элементов шрота подсолнечника и продукта его гидролиза методом ИК-Фурье спектроскопии.

Анализ спектров показал, что химический состав продукта гидролиза с высокой степенью достоверности по своему химическому составу совпадает с составом растительного белка.

Рекомендуется применять метод ИК-Фурье спектроскопии для экспресс-анализа шрота подсолнечника и продуктов его гидролиза для контроля качества белковых ингредиентов в технологических процессах их производства.

Научный руководитель: Даньшина Валентина Владимировна, Омский государственный технический университет.

## **Библиографический список**

1. González-Pérez S., Vereijken J. M. Sunflower proteins: overview of their physicochemical, structural and functional properties // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2007. Vol. 87. P. 2173–2191. Doi:10.1002/jsfa.2971.
2. Yust M. M., Pedroche J., Megias C. Improvement of protein extraction from sunflower meal by hydrolysis with alcalase // *Grasas y Aceites*. 2003. Vol. 54. P. 419–423. Doi: 10.3989/gya.2003.v54.i4.230.
3. Malik M. A., Saini C. S. Rheological and structural properties of protein isolates extracted from dephenolized sunflower meal: Effect of high intensity ultrasound // *Food Hydrocolloids*. 2018. Vol. 81. P. 229–241. Doi:10.1016/j.foodhyd.2018.02.052.
4. Rodsamran P., Sothornvit R. Physicochemical and functional properties of protein concentrate from byproduct of coconut processing // *Food Chemistry*. 2018. Vol. 241. P. 364–371. Doi:10.1016/j.foodchem.2017.08.116.
5. Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Родионова М. В. [и др.]. Сорбция ионов цинка продуктами, содержащими целлюлозную и белковую составляющие // *Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52. № 3. С. 27–31.
6. Chen J., Chen X., Zhu Q. [et al.]. Determination of the domain structure of the 7S and 11S globulins from soy proteins by XRD and FTIR // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013. Vol. 93. P. 1687–1691. Doi:10.1002/jsfa.5950.
7. Guerrero P., Hanani Z. A. N., Kerry J. P. [et al.]. Characterization of soy protein-based films prepared with acids and oils by compression // *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 107. P. 41–49. Doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.06.003.
8. Wang C., Jiang L., Wei D. [et al.]. Effect of Secondary Structure determined by FTIR Spectra on Surface Hydrophobicity of Soybean Protein Isolate // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 15. P. 4819–4827. Doi:10.1016/j.proeng.2011.08.900.
9. Ermiş E., Karasu E. N. Spray drying of de-oiled sunflower protein extracts: functional properties and characterization of the powder // *Gıda. The Journal Of Food*. 2019. Vol. 45, no. 1. P. 39–49. Doi:10.15237/gida.GD19096.
10. Pretsch E., Bühlmann P., Badertscher M. Structure Determination of Organic Compounds. Tables of Spectral Data // Springer Berlin, Heidelberg Textbook. 2020. P. 307–373. Doi:10.1007/978-3-662-62439-5.
11. Нечипоренко А. П., Миневич И. Э., Орехова С. М. [и др.]. Инфракрасная Фурье-спектроскопия в сравнительном исследовании животных и растительных белков // *Известия*

вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10, № 4. С. 678–690. Doi:10.21285/2227-2925-2020-10-4-678-690.

*Дата поступления статьи: 03.04.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 25.04.23*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. А. Ставров, 2023



*Секция*  
**Радиотехнические системы**

*Под редакцией Н. О. Голубятниковой*

УДК 004.421: 621.37: 62-97/-98

*А. В. Аганитов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ООО «НТФ «МИКРОНИКС», г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОПАРАМЕТРОВ**

**Аннотация.** В статье описана разработка виброметра, предназначенного для измерения параметров вибрации двигателей, насосов, компрессоров и других механизмов. Приведены технические характеристики устройства и его структурная схема, описан главный компонент изделия – акселерометр, представлены виды основного и дополнительного экрана интерфейса устройства. Также в статье описаны основные функции изделия и способы его применения.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, виброметр, микроконтроллер, акселерометр.

### **I. Введение**

На сегодняшний день для анализа состояния того или иного механизма с движущимися частями нередко используют так называемые виброметры – приборы, измеряющие такие параметры вибрации, как виброускорение, виброскорость и виброперемещение [1, 2]. Эти параметры нормируются для каждой технической системы и, соответственно, измерив их и сравнив с эталонными значениями, можно судить о неисправностях внутри исследуемого объекта. Контроль вибрации осуществляют в турбинных установках, автомобилях, зданиях, насосах, компрессорах, приводах, летательных аппаратах, судах для обнаружения и предотвращения возможных поломок и повреждений.

Самый распространенный и простой в реализации метод измерения основан на пьезоэлектрическом эффекте – эффекте возникновения электрического напряжения (поляризации диэлектрика) при наведении механических возмущений, такой эффект используется, как правило, в аналоговых датчиках. Существует способ измерения ускорения, основанный на изменении емкости конденсаторов в зависимости от положения прикрепленной к нему подвижной части акселерометра [3]. Уровень нынешнего развития позволяет реализовать конденсаторный эффект в очень небольших масштабах и имплементировать интерфейс взаимодействия таких изделий с устройствами пользователей, создавая новый класс технологий – МЭМС (микроэлектромеханические системы).

Целью работы является разработка недорогого устройства для измерения всех трех вибропараметров с приемлемой погрешностью, удобным и простым интерфейсом взаимодействия оператора с устройством.

### **II. Постановка задачи**

Основополагающей идеей при разработке изделия была легкость в обращении, наглядность, удобство и приемлемая погрешность измерения. Устройство для измерения вибропараметров (далее – виброметр) не должно обладать избыточным функционалом; должно иметь быстросъемное соединение между внешним датчиком и блоком отображения информации, возможность сохранять мгновенные среднеквадратические значения

вибропараметров, изменять динамический диапазон измерений с целью понижения уровня собственных шумов. Для реализации этих целей необходимо выбрать мощный микроконтроллер (для непрерывной обработки сигнала требуется большое количество оперативной памяти), что так же позволит легко модифицировать программное обеспечение.

Основные технические требования к разработанному виброметру представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Основные параметры разработанного виброметра**

Параметр	Единица измерения	Значение	
		Не менее	Не более
Диапазон измеряемых ускорений	g	±2	±16
Погрешность измерения на базовой частоте 159,2 Гц	±%	-	5 по осям 10 по модулю
Диапазон рабочих частот	Гц	3	1000
Уровень собственных шумов по одной оси	g	-	0,06
Длительность непрерывной работы при полностью заряженном аккумуляторе	ч	24	-
Частота дискретизации сигнала	Гц	6400	
Габариты (ДхШхВ) без кабеля	мм	-	135x70x25
Масса комплекта	г	-	220

### III. Структурная схема

Главным компонентом устройства для измерения вибропараметров является цифровой трехосевой МЭМС-акселерометр LIS2DS12 и мощный китайский микроконтроллер GD32F303 для обработки данных и вывода их на дисплей. Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

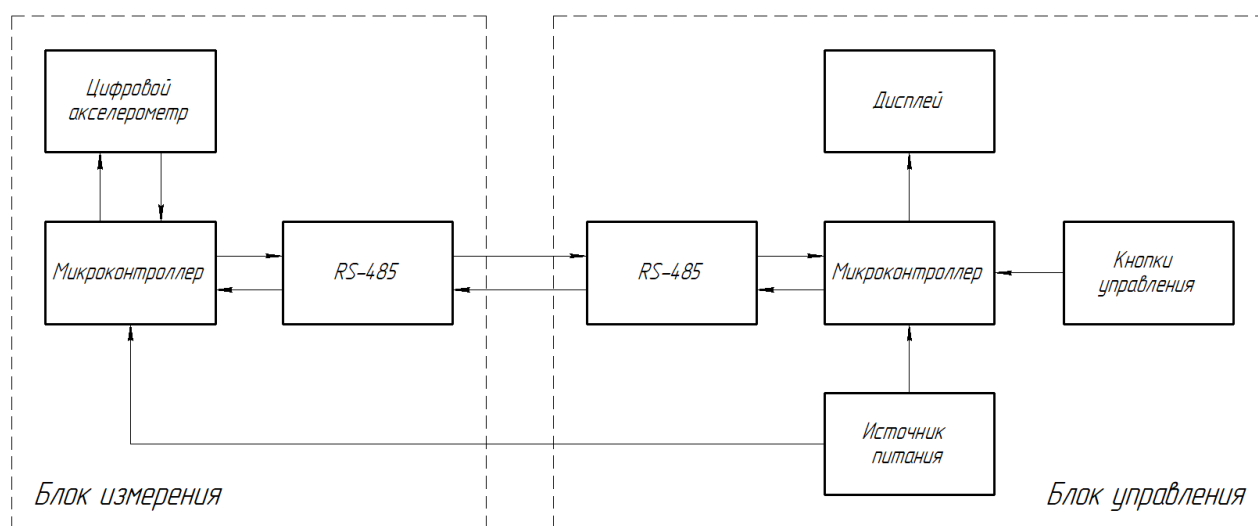


Рис. 1. Схема электрическая структурная устройства

Акселерометр LIS2DS12, используемый в виброметре, является самодостаточным и хорошо задокументированным устройством. Его главные характеристики: возможность программного выбора диапазона измерения ускорения от 2 g до 16 g, широкий температурный диапазон от -40 °C до +85 °C, 16-битный выход цифровых данных,

возможность выбора одну из трех осей измерения X, Y или Z, чувствительность от 0,061 mg/разряд до 0,488 mg/разряд и наличие реализации сразу двух популярных цифровых интерфейсов передачи данных SPI (Serial Peripheral Interface) и I2C (Inter-Integrated Circuit). Важным достоинством этого датчика также является его цена и доступность на рынке цифровых устройств.

#### IV. Практическая реализация устройства

Конструктивно разработанный виброметр состоит из двух частей: блока отображения информации и самого внешнего датчика, соединенных между собой кабелем. Датчик может крепиться к проверяемому объекту как с помощью переходных шпилек, так и с помощью магнитного крепления для тех объектов, корпус которых выполнен из магнитных материалов. Соединение между датчиком и блоком отображения выполнено разъемным, что позволяет выполнять проверку массивного технического объекта, имея, например, несколько датчиков по площади корпуса и всего один блок отображения информации. Внешний вид комплекта поставки разработанного устройства показан на рис. 2.



Рис. 2. Комплект поставки разработанного устройства

Реализовав в программе устройства взаимодействие с цифровым акселерометром, было введено две кнопки для настройки. Благодаря этим двум кнопкам можно выбрать: нужный динамический диапазон для измерения с целью понижения уровня собственных шумов, ось для измерения (или всех трех осей одновременно как модуль вектора вибрации), режим отображения вибропараметров (как амплитудное значение, среднеквадратическое значение или размах). Также устройство обладает памятью и присутствует возможность сохранить текущее значение вибровеличин вместе со временем снятия измерений с целью дальнейшего анализа. Вид основного экрана показан на рис. 3, а вид журнального экрана показан на рис. 4.

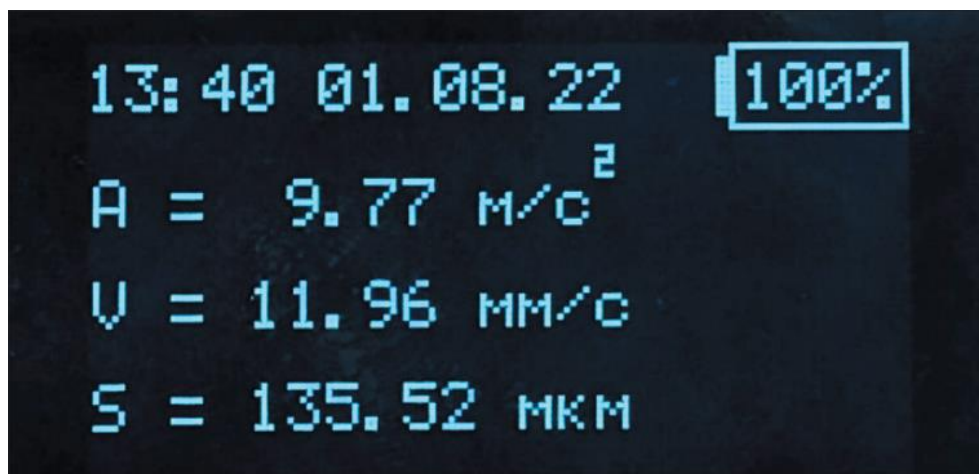


Рис. 3. Вид основного экрана устройства

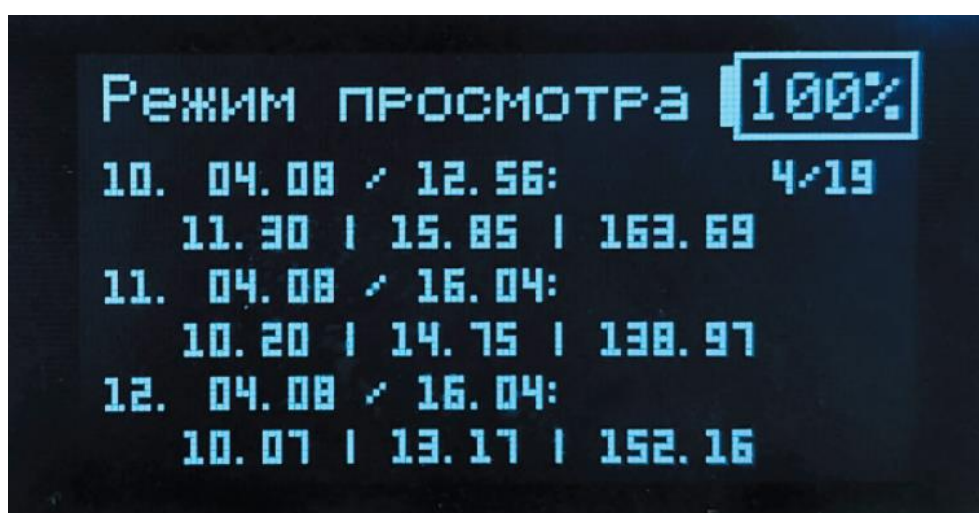


Рис. 4. Вид журнального экрана устройства

## V. Заключение

Разработанное устройство для измерения вибропараметров является универсальным прибором для измерения вибрационных параметров двигателей, насосов, компрессоров и других механизмов. Изготовленный в результате проделанной работы виброметр полностью удовлетворяет требованиям технического задания. Простота работы с виброметром позволяет сократить время на обучение персонала, а наглядный интерфейс и способ соединения внешнего датчика с блоком отображения ускоряет работу по обслуживанию технических объектов. Важным достоинством устройства является его стоимость, находящаяся в нижнем диапазоне до 50000 рублей.

Научный руководитель: Дмитрий Борисович Пономарев, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Учеб. пос. Изд. 2 е, с уточн. Новосибирск, Изд во СО РАН, 2014. 360 с.
2. Чичков Б. А. Вибродатчики и микроэлектромеханические системы мобильных устройств, как их аналоги, для оценки вибросостояния роторных машин // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 223 (1). С 120-125.

3. Павлов Д. В., Лукин К. Г., Петров М. Н. Разработка математической модели MEMS-акселерометра // Вестник НовГУ. 2015. № 8 (91). С. 22-25.

*Дата поступления статьи: 26.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. В. Агапитов, 2023

УДК 681.5

*Е. А. Аржанова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДУЛЯ СБОРА КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

**Аннотация.** В данной статье раскрывается значение платформы Arduino для проектирования устройств и систем, а также возможность её использования для обучения студентов построению радиоэлектронных устройств. На примере аппаратной и программной реализации модуля сбора климатических параметров рассмотрены основные этапы разработки, включающие в себя определение требований к устройству, подбор подключаемых модулей и модуля контроллера, а также отражающие специфические особенности использования платформы Arduino. Даны практические рекомендации по использованию платформы Arduino в системах сбора климатических параметров.

**Ключевые слова:** Arduino, модульное проектирование, система контроля, климатические параметры, модуль датчиков, удаленный модуль.

### **I. Введение**

Широкое развитие информационных технологий, в том числе их внедрение в повседневный обиход находит свое отражение в создании умных домов, домашних метеостанций, сигнализаций и других устройств малой автоматизации. Наиболее широко востребованы и представлены различные варианты приборов, оценивающие различные параметры окружающей среды.

Конечно, всегда можно приобрести готовое изделие, однако, если целью является изучение принципов построения таких устройств и получение навыков их разработки, то задача проектирования интеллектуальных модулей становится более чем оправданной. При решении данной задачи могут быть применены два подхода. Первый – готовые промышленные изделия массового спроса – индивидуальное проектирование. Второй – проекты на базе готовых модулей по принципу «электронный конструктор». Он подходит для обучения и создания проектов начального уровня.

### **II. Постановка задачи**

Задачей настоящей работы является реализация модульного подхода к проектированию системы контроля на примере создания удаленного модуля сбора датчиков климатических параметров.



В целом, система сбора климатических параметров состоит из центрального устройства и удаленных сегментов. Удаленный модуль обеспечивает измерение определенного набора параметров окружающей среды (температуры, влажности, атмосферного давления и т.д.) с заданной периодичностью. Промежуточное хранение этих значений с целью дальнейшей передачи данных на центральный модуль системы. Причем оптимальным решением является использование беспроводного канала связи. Центральный модуль обеспечивает сбор данных климатических параметров с удаленных модулей и предоставляет данные пользователю в удобном для восприятия виде. Причем интерфейс пользователя центрального модуля может быть реализован на персональном компьютере, либо на устройстве Android.

### III. Базовые принципы построения систем на платформе Arduino

Одной из наиболее популярных и оптимальных платформ для модульного проектирования является Arduino. С практической точки зрения – это электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки электронных устройств.

Основоположником платформы Arduino стал Массимо Банци – доцент Института проектирования взаимодействий города Ивреа. Банци и его группа поставили цель, создать доступное устройство, чтобы студенты могли себе позволить учиться на данной платформе, просто включив его [1]. Первый прототип появился в 2005 году на основе микроконтроллера ATmega328.

В настоящее время существует множество плат (модулей) Arduino и их аналогов: Nano, Mini, Uno, Leonardo, Mega, Lilypad. Выбор модуля определяется решаемой задачей, поскольку сами модули различаются между собой по размеру, количеству линий ввода-вывода, объему внутренней памяти, наличию дополнительных периферии непосредственно на плате и т.д. К примеру, на рис. 1 приведена обобщенная архитектура подключения периферии для модуля Arduino Mega.

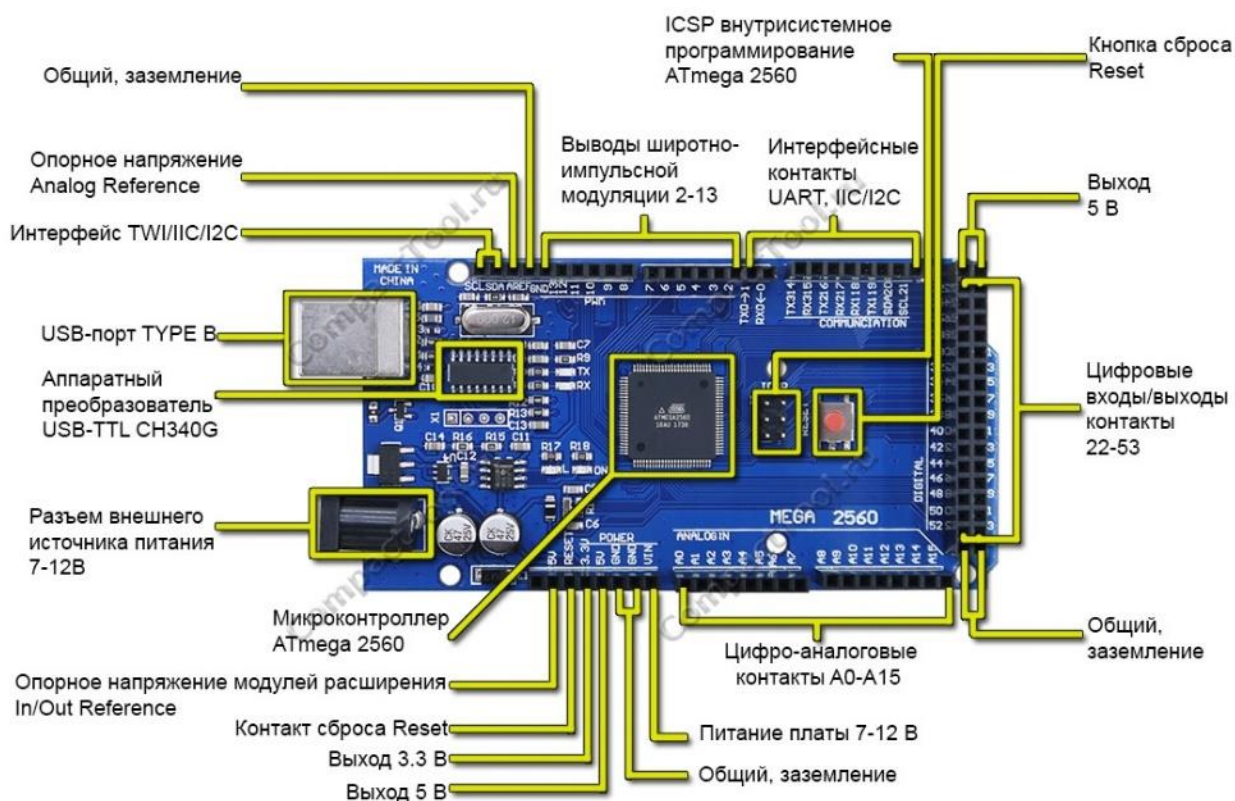


Рис. 1. Периферия Arduino Mega

Arduino представляет собой открытую систему, в которую пользователи вносят вклад, предлагая свои разработки. Проекты, созданные разработчиками, чаще всего, представляют собой центральный модуль с набором внешних периферийных устройств, обеспечивающих получение, управление и вывод информации на отображающее устройство. Получение информации происходит через модули датчиков. Модули совместимые с Arduino постоянно пополняются [2].

Благодаря использованию Arduino ускоряется процесс разработки проекта. Это происходит благодаря тому, что, во-первых, на базе платформы существует большое количество модулей совместимых с платами. Во-вторых, простая и понятная среда программирования позволяет быстро создать требуемый программный код.

Таким образом, задачей разработчика является грамотный выбор подключаемых внешних модулей и их объединение в единое устройство, как на аппаратном, так и на программном уровне в зависимости от решаемой задачи.

#### **IV. Аппаратная реализация модуля сбора климатических параметров**

Перейдем к аппаратной реализации устройства. Рассмотрим использование Arduino для проектирования модуля датчиков климатической системы, имеющей возможность измерения следующих параметров (в зависимости от конкретного набора используемых датчиков):

- температура;
- скорость ветра;
- влажность;
- давление;
- уровень запыленности;
- освещенность.

Отличительной особенностью разработки модуля является не столько конкретный климатический параметр, измеряемый датчиком, сколько интерфейс подключения этого датчика к модулю. Т.е. предусматривается возможность оперативной замены, например, датчика температуры на датчик освещенности. Главное, чтобы и тот и другой имели один и тот же интерфейс подключения, например I2C. Причем оба датчика могут быть заранее внесены в микропрограмму контроллера Arduino и, при подключении тип датчика будет определен автоматически.

Для подключения внешних устройств Arduino чаще всего использует встроенные интерфейсные модули: UART, SPI и I2C. У каждого из перечисленных интерфейсов есть свои преимущества и недостатки, а также свои устройства, использующие только тот или иной интерфейс для связи с внешним миром.

Интерфейс передачи информации I2C позволяет обеспечить параллельное подключение нескольких датчиков к одному входу контроллера, что является его главным преимуществом.

Цифровые датчики обладают интерфейсом I2C, SPI, 1-Wire. Однако, на платах Arduino отсутствует интерфейс 1-Wire, но его легко реализовать программно.

Аналоговые датчики чаще всего требуют схемы дополнительного преобразования сигнала перед подачей на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Многоканальный 10 разрядный АЦП позволяет проводить измерения аналогового напряжения с нескольких каналов. Схема преобразования сигнала зависит от типа датчика. Например, для термометра сопротивления необходимо произвести преобразование сопротивления в напряжение, причем с обеспечением требуемого динамического диапазона.

В общем случае, модуль датчиков должен обеспечивать прием информации, как по цифровым, так и по аналоговым интерфейсам.



Для локального отображения результатов измерений может быть использован дисплей, хотя это не является обязательным. В конечном итоге, данные должны быть переданы пользователю на центральный модуль.

В рассматриваемом случае, оптимальной является реализация передачи информации через радиочастотный модуль, подключаемый к контроллеру Arduino по интерфейсу UART.

В результате набор периферийных устройств, наиболее подходящих для решаемой задачи выглядит следующим образом:

- пять внешних датчиков (два датчика по интерфейсу I2C один датчик 1-Wire и два аналоговых датчика):
  - датчик температуры и влажности DHT 22 (интерфейс 1-Wire);
  - датчик интенсивности света GY-302 (BH1750) (I2C);
  - датчик атмосферного давления BMP280 (I2C или SPI);
  - датчик температуры по напряжению LM35;
  - датчик температуры по сопротивлению SNS-TMP10K типа NTC;
- локальное устройство отображения: дисплей OLED 128x64 (интерфейс SPI);
- радиочастотный модуль связи: приемопередающий модуль RFBeе (UART) [3];
- часы реального времени DS3231 (интерфейс I2C).

Структурная схема удаленного модуля датчиков представлена на рис. 2.

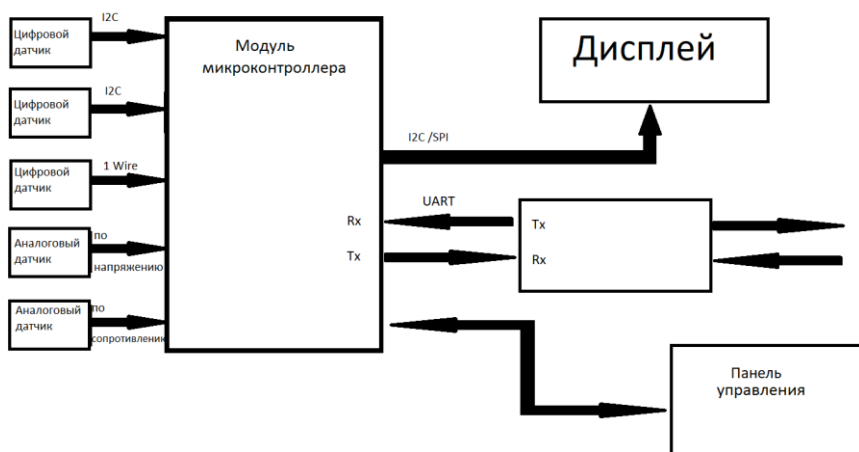


Рис. 2. Структурная схема удаленного модуля датчиков

Для создания работоспособного макета можно воспользоваться готовой макетной платой и набором проводов-перемычек. Если же требуется создать более-менее готовое устройство, то потребуются разработка кросс-платы, позволяющей конструктивно объединить все используемые модули.

## V. Программная реализация

Одним из критериев подбора периферийных устройств, помимо совместимости с Arduino, является программная совместимость – скетч, который необходимо слегка доработать. Соблюдая этот критерий, мы сможем собрать рабочий макет.

Программная часть заключается в разработке двух ПО: для Arduino и для ПК, которые будут обеспечивать отображение приема данных от центрального модуля. Разработка программного обеспечения осуществляется в среде Arduino.ide.

Arduino.ide – это среда для программирования модулей и плат Arduino. В ней содержится большой список встроенных скетчей и готовых примеров на все датчики и модули, которыми можно воспользоваться и значительно ускорить и упростить программирование прибора. Для работы нам достаточно подключить скетчи и назначить

порты. Это позволяет быстро и просто запустить прибор. Язык программирования устройств Arduino основан на C/C++ что делает его простым в освоении.

Для модулей, на которые ещё не созданы библиотеки и скетчи, в нашем случае RFbee, используется универсальный скетч работы по интерфейсу UART.

Через заданный интервал времени устройство должно осуществлять чтение информации с датчиков. Результаты хранятся в оперативной памяти контроллера и выдаются пользователю по запросу. Вывод на дисплей происходит по нажатию кнопки. В остальное время прибор спит и не потребляет энергию, сохраняя заряд электрического питания.

## VI. Заключение

Разработка модуля датчиков показала, что использование платформы Arduino на начальном этапе является оправданной. Платформа ускоряет разработку и получение рабочего макета устройства. Система Arduino подходит для обучения студентов.

Научный руководитель: Борис Петрович Ионов, Омский государственный технический университет. Консультант: Антон Борисович Ионов, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

5. История создания. Arduino-технология. URL: <https://arduino-tech.ru/sample-page/> (дата обращения: 03.04.23).

6. Обзор датчиков Arduino. URL: [https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/?PAGEN\\_1=2](https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/?PAGEN_1=2) (дата обращения: 03.04.23).

7. Datasheet. RFBee User Manual v1.1. 2010. URL: [https://files.seeedstudio.com/wiki/RFbee\\_V1.1-Wireless\\_Arduino\\_compatible\\_node/res/rfbee-manual.pdf](https://files.seeedstudio.com/wiki/RFbee_V1.1-Wireless_Arduino_compatible_node/res/rfbee-manual.pdf) (дата обращения: 03.04.23).

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. А. Аржанова, 2023

УДК 621.396.67

*В. В. Боровиков, В. Н. Кемский*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## РАЗРАБОТКА МАЛОЗАМЕТНОЙ ПРИЗЕМНОЙ АНТЕННЫ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

**Аннотация.** В данной статье представлен вариант быстроразворачиваемой малозаметной приземной антенны декаметрового диапазона волн, обладающей повышенной мобильностью. Располагается данная антенна вдоль земной поверхности. Были приведены результаты электродинамического моделирования. Данный тип антенн может быть использован в случаях, когда требуется повышенная скрытность в сочетании с низкими временными затратами на развертывание.

**Ключевые слова:** приземная антенна, разведзащищенность, коэффициент усиления.

## I. Введение

В условиях территорий, где недоступна сотовая, радиорелейная и спутниковая связи, а именно: высокие широты (крайний север), гористая местность, либо неподготовленная местность (глухие районы), для организации связи целесообразно использовать декаметровый диапазон частот. Объясняется это экономической эффективностью и малыми временными затратами на развертывание при эксплуатации соответствующей техники связи.

Как показывает опыт, после стихийных бедствий (ураган, снежная буря и т.п) или запланированного вывода из эксплуатации стационарных антенн (ремонтные, профилактические работы) связь с корреспондентами удается довольно быстро восстановить при использовании данного подхода. Аппаратура коротковолнового диапазона частот способна функционировать на радиотрассах различной протяженности, включая дальнюю (более 1000 км) [1].

Приземные антенны представляют собой систему токонесущих проводников, расположенных вдоль земной поверхности [2].

Этот тип антенн обладает преимуществами в виде малозаметности и низких временных затрат на развертывание за счет компактного расположения на местности путем укладывания проводников вдоль поверхности земли. В свою очередь, как недостаток, такое расположение антенны приводит к высокой зависимости ее параметров от подстилающей поверхности [3].

Данную антенну можно отнести к классу малогабаритных антенн.

## II. Постановка задачи

Целью работы является изготовление быстроразворачиваемой малозаметной приземной антенны декаметрового диапазона волн, а также сравнение различных методов измерения характеристик изделия. Сравнение будет строиться на основе анализа коэффициента укорочения (волнового числа) на различной подстилающей поверхности, коэффициента укорочения по первой резонансной частоте и др. Экспериментальная проверка будет проводиться на разных длинах трасс. Основная идея провести анализ симметричной антенны несимметричным анализирующим прибором.

## III. Теоретические сведения

Выполняются измерения входного сопротивления в частотной области с помощью сетевого анализатора. Антенна расположена горизонтально над грунтом с потерями. Измерения проводятся без безэховой камеры, и, следовательно, результаты сильно искажаются отражениями от окружающих объектов. Чтобы справиться с этим, результаты измерений будут конвертироваться обратным преобразованием Фурье во временную область, после чего используется стробирование по времени для удаления этих нежелательных отражений. Фактический импеданс антенны можно извлечь впоследствии, выполнив преобразование Фурье обратно в частотную область [4].

Кроме того, для правильного измерения сбалансированных нагрузок, таких как рассмотренные здесь антенны, требуется согласующий трансформатор.

Известно [5], что в приближении длинной линии дипольная симметричная антенна (СА) может быть представлена как линия с потерями, разомкнутая на конце, а её импеданс описан как:

$$Z=W \cdot \text{cth}(\gamma L), \quad (1)$$

где  $W$  – волновое сопротивление СА,  $L$  – длина плеча дипольной СА,  $\gamma=\alpha+i\beta$  коэффициенты затухания и фазы ( $\alpha$  и  $\beta$ ).

Основные характеристики (импеданс, действующая длина, КПД и пр.) СА определены постоянной распространения волны вдоль проводника  $\gamma$ , поскольку последняя задаёт распределение тока по нему. Поэтому задача повышения точности выражения постоянной распространения волны  $\gamma$  вдоль проводника СА через характеристики подстилающей поверхности является актуальной.

Предварительный анализ значений  $\gamma$  показывает, что результаты известных способов определения  $\gamma$ , как аналитические, так и требующие применения вычислительных методов, значительно отличаются.

Для определения входного сопротивления антенны (сопротивления нагрузки) при помощи измерительных линий требуется снять кривую распределения напряженности поля вдоль линии, определить по снятой кривой коэффициент бегущей волны  $k_{БВ}$  и координаты точки минимума поля в короткозамкнутой и нагруженной линии, а затем произвести расчет по формулам (2) - (3) или с помощью диаграммы Вольперта – Смита.

$$|\Gamma_H| = \frac{1 - k_{БВ}}{1 + k_{БВ}}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_H$  – коэффициент отражения (безразмерная величина).

$$\hat{Z}_A = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (3)$$

где  $\hat{Z}_A$  – коэффициент стоячей волны (безразмерная величина),  $\Gamma$  – коэффициент отражения (безразмерная величина).

На рис. 1 показан примерный вид изменения напряжения на выходе индикаторной головки при ее перемещении вдоль линии. Точками отмечены экспериментальные данные, соответствующие движению головки в одну сторону, а кружками – в другую. По этой кривой определяется коэффициент бегущей волны (КБВ) в линии:

$$k_{БВ} = \frac{E(U_{min})}{E(U_{max})}, \quad (4)$$

где  $E(U_{min})$  и  $E(U_{max})$  – значения напряженности поля в точках минимума и максимума, определенные по градуировочной кривой анализатора измерительной линии.

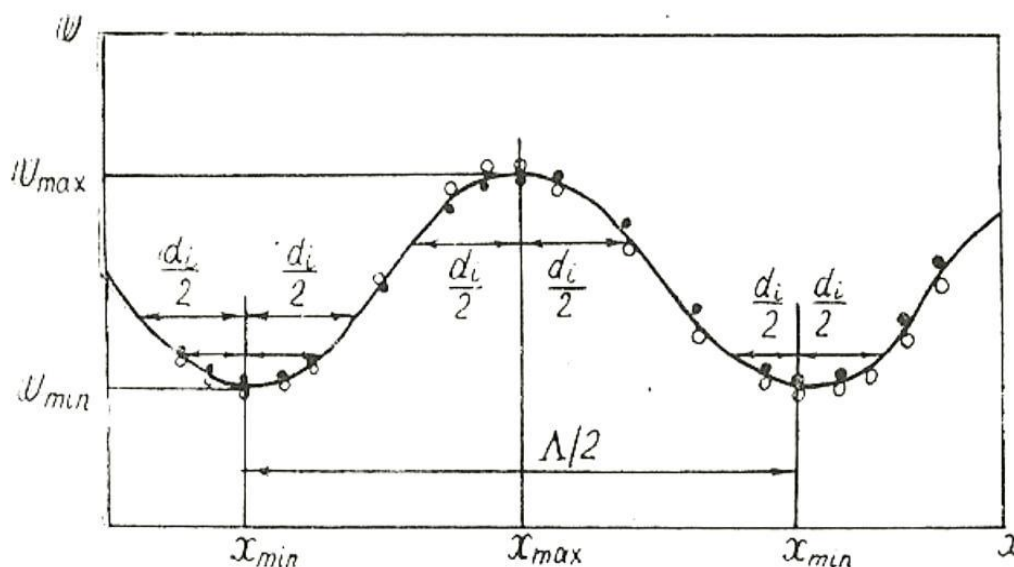


Рис. 1. Изменение напряжения на выходе индикаторной головки

Для того чтобы найти точку минимума напряженности поля, следует провести несколько хорд, параллельных оси абсцисс (рис. 1). Средние точки хорд дают координату минимума. Если разным хордам соответствуют разные координаты, то их усредняют. Разброс данных может служить критерием точности измерений.

При сравнительно малом  $k_{БВ}$  ( $k_{БВ} < 0,2$ ) трудно достаточно точно снять всю кривую распределения напряженности из-за квадратной характеристики детектора, так как при этом отношение  $U_{min}/U_{max}$  становится очень малым. Достаточно точную величину в этих условиях можно получить разными способами. Один из них заключается в снятии небольшого участка кривой в области минимума или максимума. Затем по длине хорды  $d$ , а также по значению напряженности поля, на уровне которого проведена хорда (рис. 2), вычисляют КБВ:

$$k_{БВ} = \frac{\sin \pi \frac{d}{\lambda}}{\sqrt{\frac{E^2(U_d)}{E^2(U_{min})} - \cos^2 \pi \frac{d}{\lambda}}}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны в измерительной линии на исследуемой частоте,  $U_d$  – напряжение вдоль линии (В).

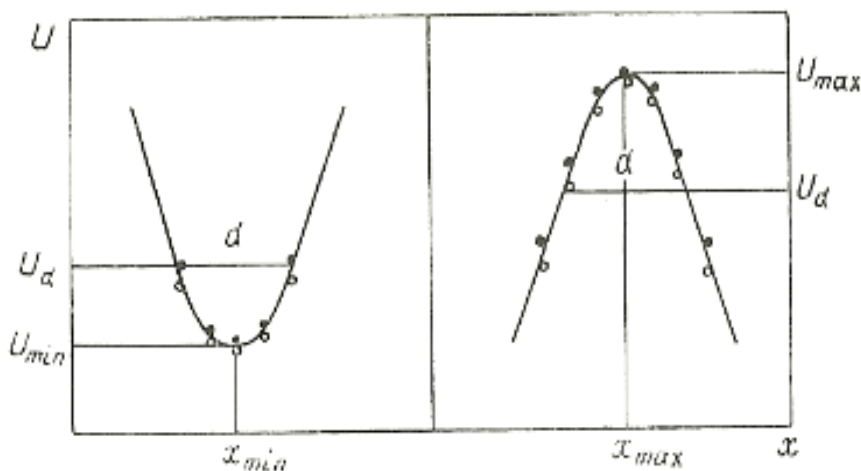


Рис. 2. Определение длины хорды

Ввиду существующих недостатков известных методов предлагается аппроксимировать импеданс одной дипольной стелющейся антенны посредством выражения (1). Отличается оперативностью – не надо множество антенн для получения более точного значения, а также работоспособен в широком диапазоне частот (расширен диапазон в область низких частот относительно метода по волновому сопротивлению – в котором требуется ожидание «устаканивания» параметров)[6]. Пока на ранних этапах исследований антенна ведёт себя как длинная линия – т.е. нижняя граница применения, в районе четверти длины волны с учётом укорочения – для 110 метров это около 1–1,5 МГц.

#### IV. Результаты моделирования

Схематичное изображение приземной антенны показано на рис. 3. Выполнена она в форме фрактала (кривая Гильберта). Итоговая занимаемая на местности площадь составляет 3х3 метра, а общая длина провода 110 метров. Диаграммы направленности изображены на рис. 4. График сравнения импедансов прямой и фрактальной линии излучателя представлен на рис. 5. График коэффициента стоячей волны (КСВ) с согласующим устройством изображен на рис. 6.

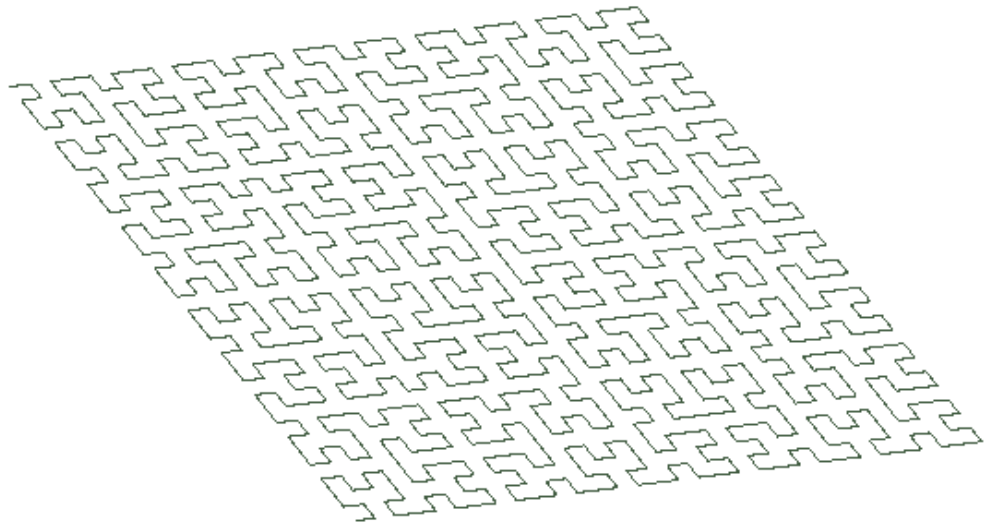


Рис. 3. Схематичное изображение приземной антенны

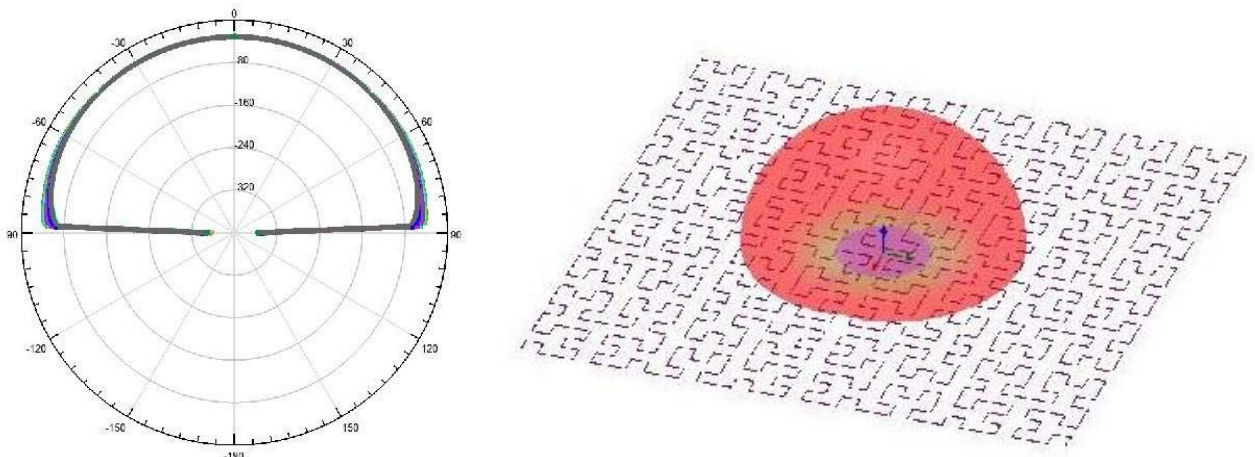


Рис. 4. Диаграммы направленности

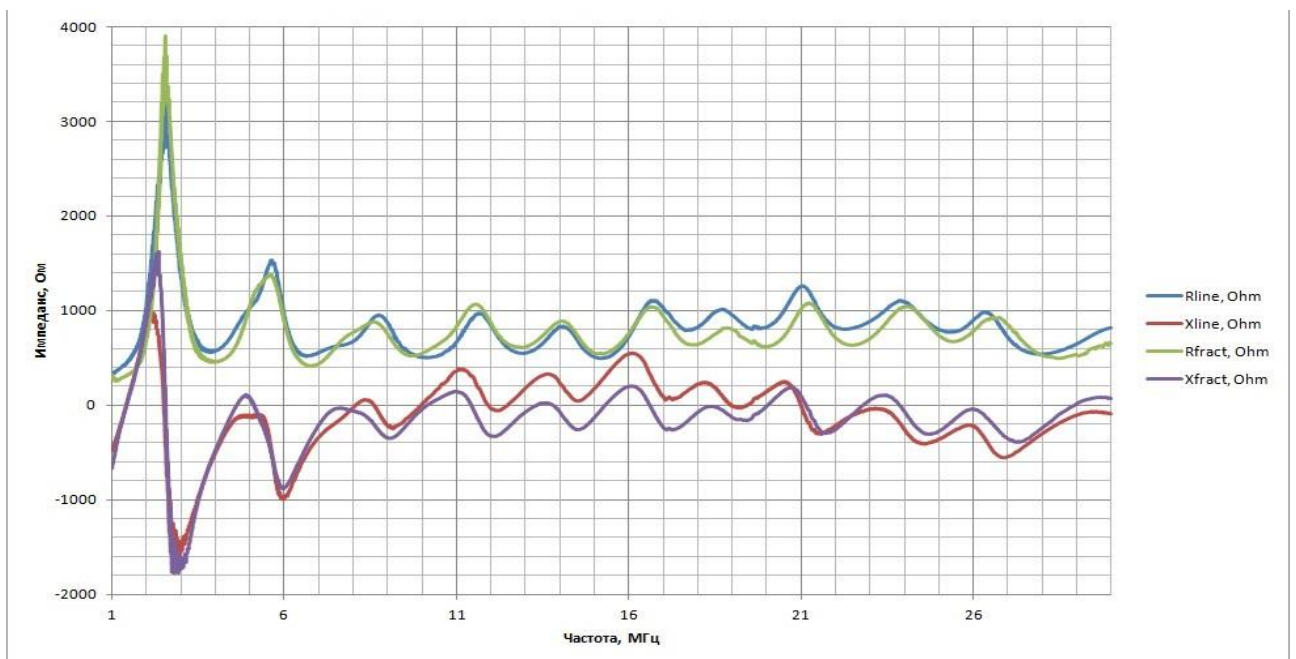


Рис. 5. Сравнение импедансов прямой и фрактальной линии излучателя



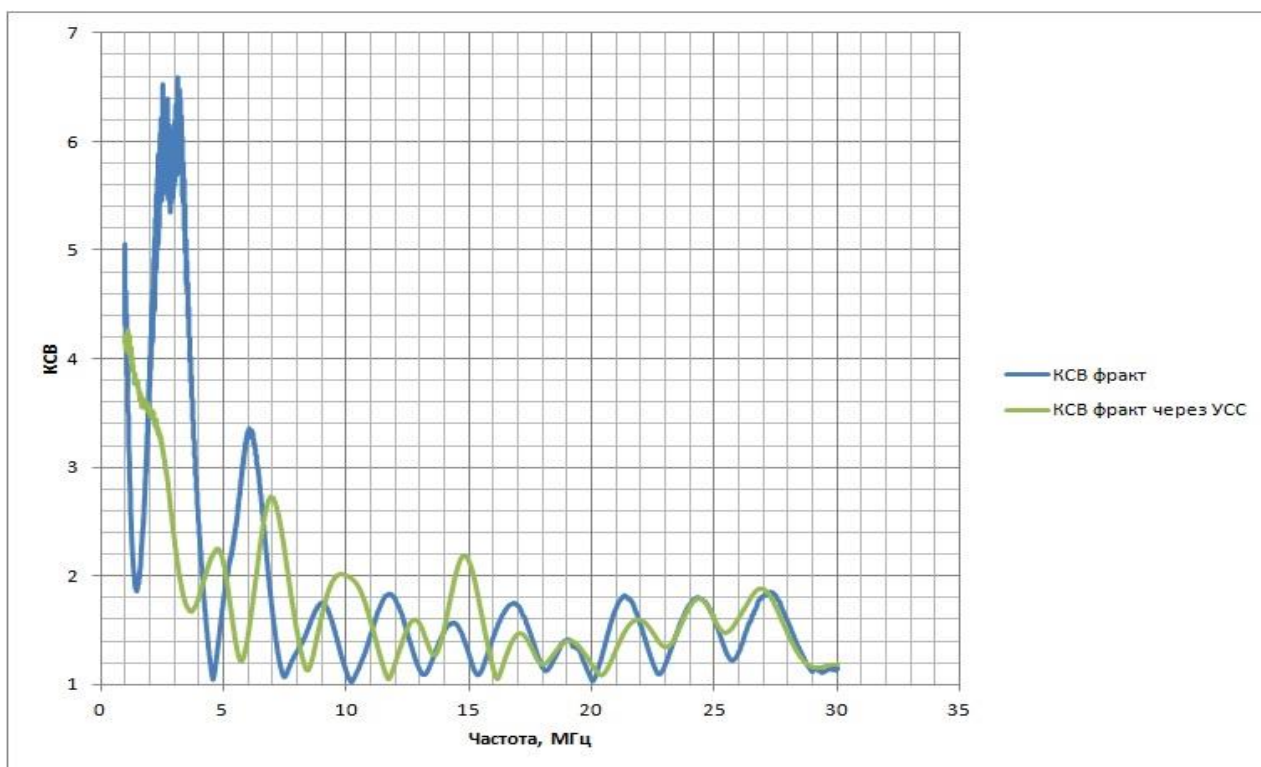


Рис. 6. Графики КСВ фрактальной антенны с согласующим устройством и без него

Исходя из графика КСВ, можно сделать вывод, что данная антенна является широкодиапазонной и перекрывает почти весь спектр коротких волн (3–30 МГц). Круговая диаграмма направленности упрощает эксплуатацию антенны, т. к. имеется возможность развернуть ее на любой поверхности и КУ будет равен во всех направлениях.

## VI. Заключение

В объеме работы на момент написания статьи можно сделать следующие выводы: разработанная антенна работает в широком диапазоне частот, определенно имеется выигрыш в габаритах. Круговая диаграмма направленности и простота конструкции способствует возможности использования данной антенны неквалифицированными специалистами, т. к. не требуется организация развертывания антенны на определенный азимут.

Для более подробного результата требуются трассовые испытания на достаточно удаленных расстояниях, а также моделирование данной антенны с учетом различных подстилающих поверхностей.

Научный руководитель: Дмитрий Юрьевич Киселев, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Гуляев Ю. В., Неганов В. А. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
2. Лавров Г. А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. М.: Советское радио, 1965. 473 с.
3. Надененко С. И. Антенны. М.: Государственное издание литературы по вопросам связи и радио, 1959. 552 с.
4. Попов О. В., Сосунов Б. В., Фитенко Н. Г., Хитров Ю. А. Методы измерений характеристик антенно – фидерных устройств. Л.: ВАС, 1990. 182 с.



5. Balanis C. A. Antenna theory. Analysis and design. John Wiley & Sons, Inc., 2016. 1095 p.
6. Сосунов Б. В., Филипов В. В. Основы расчета подземных антенн. Л.: ВАС, 1900. 472 с.

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 16.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. В. Боровиков, В. Н. Кемский, 2023

УДК 681.325.3

*А. Л. Григорьев, А. И. Одинец*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ГЕНЕРАТОР ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

**Аннотация.** В данной работе разработан и практически реализован генератор псевдослучайных чисел двумя способами: на микроконтроллере и жесткой логике. В результате генератор псевдослучайной последовательности на микроконтроллере более гибок в изменении характеристик последовательности, а генератор, реализованный на жесткой логике энергоэффективен и более быстродействующий.

**Ключевые слова:** генератор псевдослучайных чисел, шифрование, кодирование, регистр сдвига.

### I. Введение

Генератор псевдослучайных последовательностей (ГПСП) порождает последовательность чисел, элементы которой почти независимы друг от друга и подчиняются заданному закону распределения (псевдослучайные числа обычно имеют равномерный закон распределения). ГПСП – ключевая часть систем информационной безопасности, а также важный измерительный прибор при проведении испытаний различных изделий на помехоустойчивость.

Небольшой список применений ГПСП:

- генераторы сессий (PHPSESSID);
- генерация текста для «капчи» (от CAPTCHA – англ. Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart – полностью автоматизированный публичный тест Тьюринга для различения компьютеров и людей) – компьютерный тест, используемый для того, чтобы определить, кем является пользователь системы: человеком или компьютером;
- генератор паролей;
- моделирование шумового воздействия;
- криптография и информационная безопасность;
- развлечения и игры [1].

Наша цель исследования – разработать и практически реализовать ГПСП в двух вариантах: на микроконтроллере и жесткой логике.

## II. Теория

### 1) Реализация ГПСП на сдвиговом регистре.

На рис. 1 показана практическая схема генератора псевдослучайной последовательности на 31-разрядном сдвиговом регистре. Обратная связь осуществляется с выходов 30 и 17 регистра через двухвходовой элемент «Исключающее ИЛИ» с инвертором. Из-за применения инвертора запрещенным состоянием генератора является код 1111...1 (а не код 000...0), который в данном случае исключается очень просто – начальным сбросом регистров в ноль при включении питания по сигналу «Сброс». Генератор выдает псевдослучайную последовательность 31-разрядных кодов со всех выходов регистра, а также псевдослучайную последовательность нулей и единиц на любом из выходов регистра.

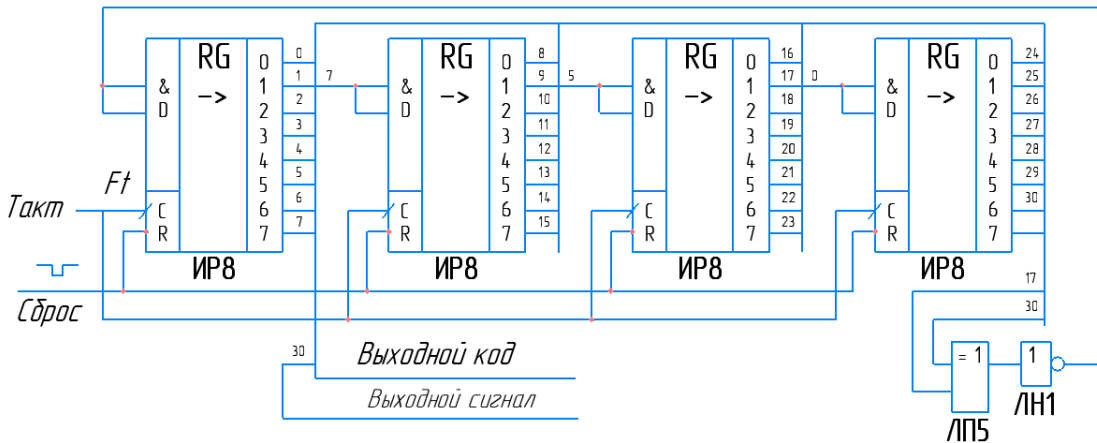


Рис. 1. ГПСП. Схема принципиальная

### 2) Реализация ГПСП на платформе Arduino Uno [2], выполненной на базе микроконтроллера ATmega328.

Платформа Arduino Uno рис. 2 имеет 14 цифровых входов/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы широтно-импульсного модулятора), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор с тактовой частотой 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

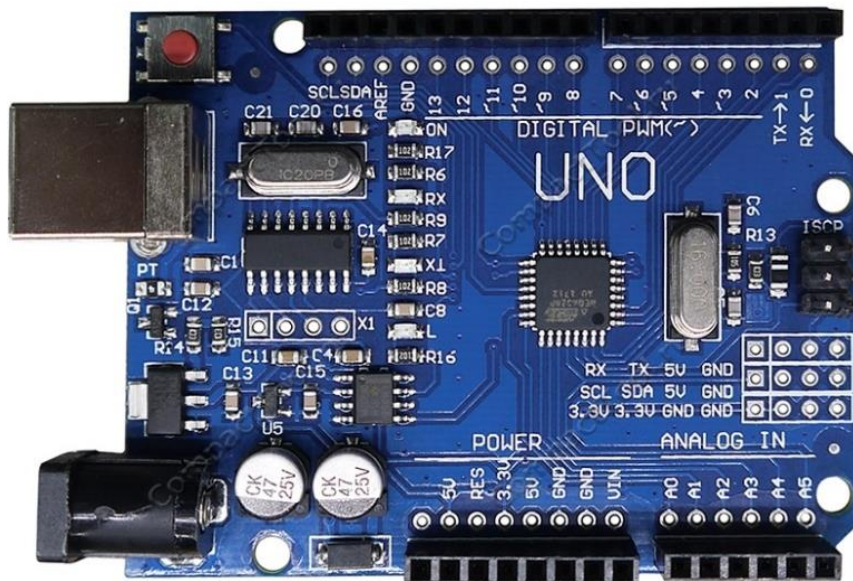


Рис. 2. Модуль Arduino Uno

Реализовать ГПСЧ на платформе Arduino можно с помощью встроенной функции random. Генератор ПСП на Arduino является 32-битным и может выдать последовательность длиной 2 147 483 647 чисел.

Писать код программы для Arduino, именуемый «Sketch», будем в среде разработки Arduino IDE рис. 3. В Arduino IDE все написанные скетчи компилируются в программу на языке C/C++ с минимальными изменениями. Компилятор Arduino IDE значительно упрощает написание программ для этой платформы и создание устройств на Arduino становится намного доступней людям, не имеющим больших познаний в языке C/C++.

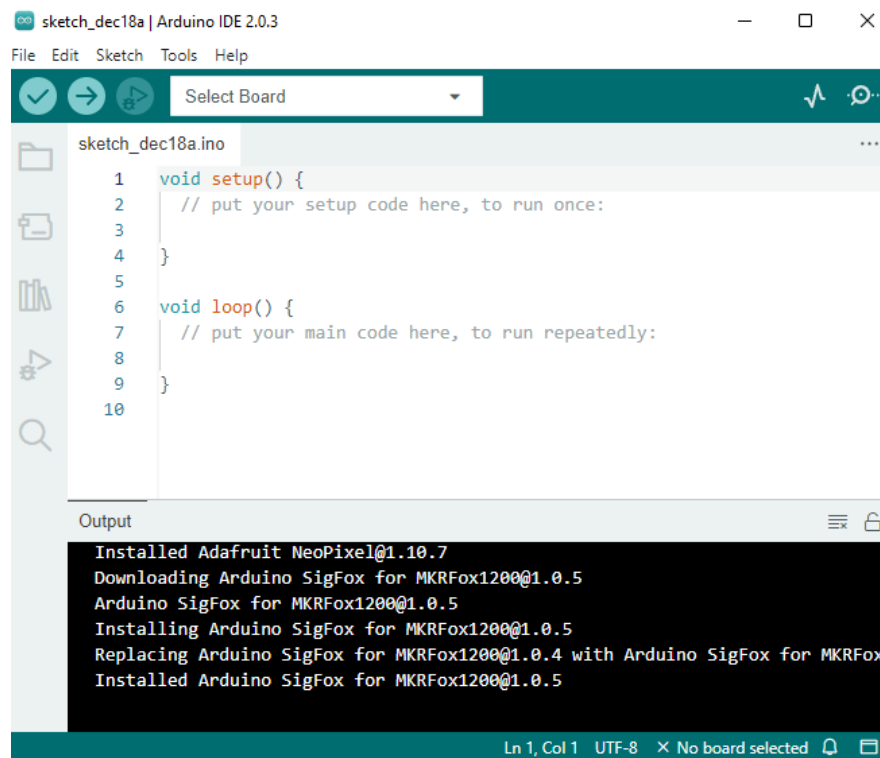


Рис. 3. Вид главного окна программы Arduino IDE

Код Sketch:

```
long randNumber;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  randomSeed(3); // установка начального значения, если надо что бы при каждом
// запуске/перезапуске последовательность не повторялась можно снимать показания с
// аналогового выхода команда analogRead
}
void loop() {
  randNumber = random(0,99999); // диапазон генерируемого числа,
// максимум 2^32 или 32 бита
  delay(5000); // задержка между выводами чисел на экран
  Serial.println(randNumber); // вывод сгенерированного числа
}
```

В окне программы с написанным Sketch на рис. 4 можно заметить последовательность чисел, генерируемую в заданных нами пределах. Если мы перезапустим программу, то генерироваться будет такая же последовательность чисел рис. 5, т.к. начальное значение randomSeed не изменилось.

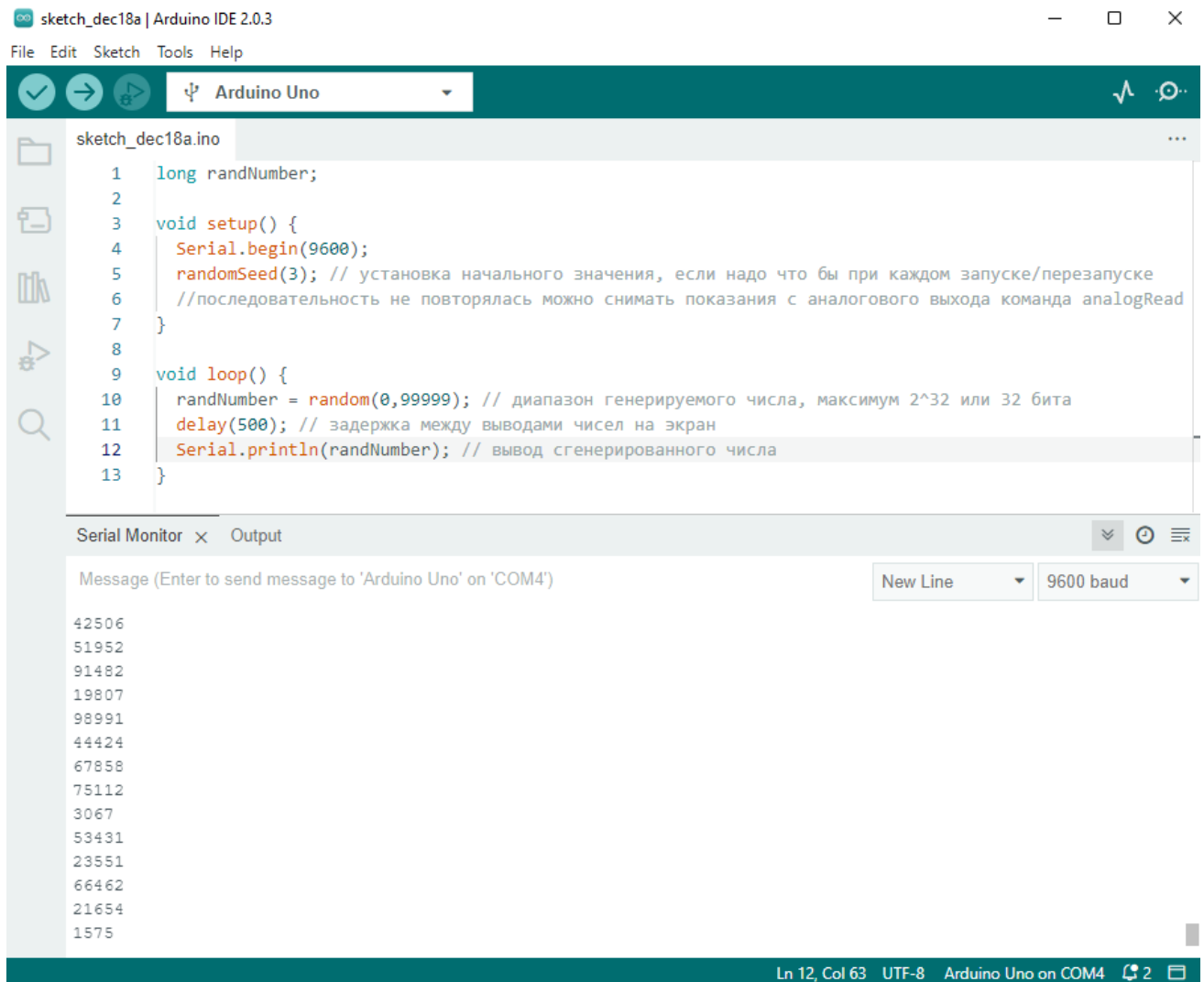


Рис. 4. Результат выполнения программы ГПСП

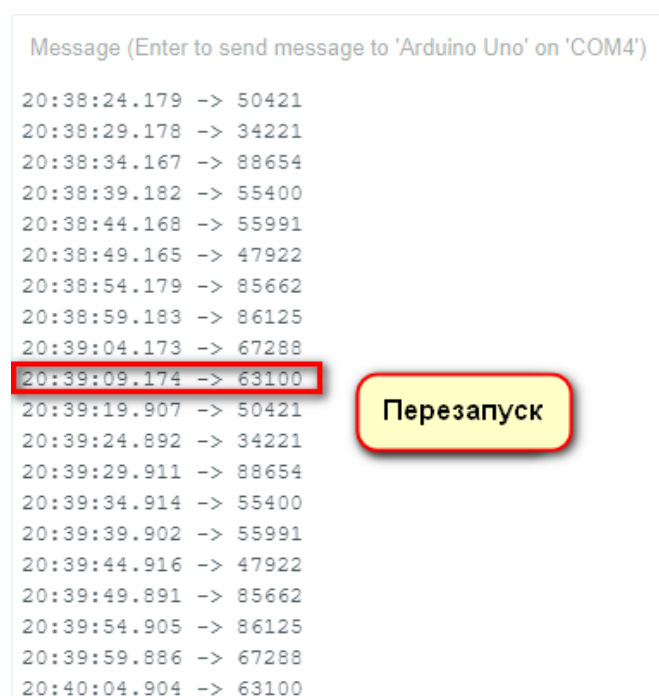


Рис. 5. Перезапуск платформы Arduino Uno

### **III. Выводы и заключение**

В результате у нас получилось реализовать ГПСП двумя способами, на микроконтроллере и жесткой логике.

Практический результат: ГПСП на жесткой логике имеет более высокое быстродействие, меньше потребляет энергии по сравнению с генератором на микроконтроллере. При этом ГПСП на жесткой логике не имеет гибкости в изменении выдаваемой последовательности. ГПСП на микроконтроллере позволяет изменять характеристики последовательности программным путем, изменяя код программы, и дает возможность реализовать множество видов ГПСП.

### **Библиографический список**

1. Дроздова И. И., Жилин В. В. Генераторы случайных и псевдослучайных чисел // Технические науки в России и за рубежом: материалы VII Междунар. науч. конф. М.: Буки-Веди, 2017. С. 13–15. ISBN 978-5-4465-0943-0.
2. Монк С. Програмируем Arduino. Основы работы со скетчами. СПб.: Изд-во Питер, 2016. 176 с. ISBN 978-5-496-01956-9.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 08.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Л. Григорьев, А. И. Одинец, 2023

УДК 004.415.533

*В. А. Дышлевский*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА**

**Аннотация.** В статье сформулированы требования к программно-техническому комплексу на основе анализа современных интеллектуальных приборов учета. На основании этого сформулированы задачи, которые должен выполнять разрабатываемый комплекс. Разработана структурная схема программно-технического комплекса автоматизированного тестирования приборов учета электроэнергии и подобраны технические решения для его реализации.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, интеллектуальный прибор учета, автоматизированное тестирование, программно-технический комплекс.

### **I. Введение**

С включением цифровизации экономики в перечень основных направлений стратегического развития РФ, резко актуализировался процесс цифровизации в электроэнергетической отрасли. «Суть цифровой электроэнергетики заключается в создании информационно-телекоммуникационной инфраструктуры и аппаратно-программных средств, обеспечивающих технологическую возможность применения решений промышленного интернета, мероприятия по совершенствованию нормативно-правовой и

нормативно-технической документации, меры по кадровому и информационному обеспечению» [1].

Процесс цифровой трансформации электроэнергетики, в свою очередь, породил потребность во внедрении интеллектуальных счетчиков в систему учета электроэнергии. Интеллектуальные приборы учета (ИПУ) представляют собой функционально насыщенные устройства на базе высокопроизводительных микропроцессоров с множеством интерфейсов и возможностью работы в самоорганизующихся сетях. Высокие темпы развития функционала и большие объемы выпуска усиливают риски и возможные издержки выпуска некачественной продукции.

«Основным инструментом повышения надежности программного обеспечения (ПО) является тестирование. Тестирование – это процесс выполнения программ при некотором наборе данных, для которого заранее известен результат применения этих программ. Цель тестирования – нахождение ошибок» [2].

## **II. Постановка задачи**

Целью данной работы является разработка аппаратной части программно-технического комплекса (ПТК) для тестирования программного обеспечения приборов учета электроэнергии. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, проанализировать функционал современных ИПУ электроэнергии и разработать методики автоматизированного тестирования. Во-вторых, сформулировать требования к ПТК. В-третьих, разработать структурную схему ПТК и варианты его технической реализации.

## **III. Требования к программно-техническому комплексу**

Современные ИПУ электроэнергии являются средством измерения, позволяющим определять количество потребляемой активной и (или) реактивной электрической энергии в определенный промежуток времени. «Они также реализуют дополнительные функции обработки событий о внешних воздействиях, о событиях в силовых измерительных цепях, о событиях мониторинга параметров измерительных цепей, причем некоторые, например, вскрытие крышек и воздействие внешним магнитным полем уже являются обязательными. Кроме того, ИПУ имеют интерфейсы для связи с внешними устройствами, наиболее популярными из которых являются: оптический порт, RS-485, радиоканал, ZigBee, GSM и PLC (передача по электрическим проводам), причем, оптический порт и RS-485 являются обязательными» [3].

Исходя из выше сказанного, разрабатываемый комплекс должен:

- подавать на силовые цепи тестируемого ИПУ порции активной и реактивной прямой и обратной электроэнергии с изменяемыми параметрами;
- воздействовать на тестируемый ИПУ постоянным магнитным полем, температурным воздействием и механическими воздействиями в виде вскрытия корпуса и крышки зажимов;
- информационно взаимодействовать с тестируемым ИПУ по интерфейсам RS-485, радиоканал, ZigBee, GSM, PLC и через оптический порт.

## **IV. Разработка программно-технического комплекса**

Основной функцией прибора учета является учет ресурсов. Для тестирования функций измерения и учета параметров электрической сети, в состав разрабатываемого ПТК должен входить прецизионный источник тока и напряжения.

Помимо учета энергии, ИПУ обладает дополнительными функциями. Например, отслеживание вскрытия крышек корпуса и клеммника, обнаружение воздействия

постоянным магнитным полем, аварийное отключение при перегреве счетчика. Поэтому ПТК должен обладать возможностью воспроизводить данные условия.

В период тестирования новой прошивки ИПУ вероятны выпуски многочисленных версий ПО. Для сохранения универсальности ПТК и сокращения времени, затрачиваемого на программирование тестируемого счетчика, автоматизированный стенд должен содержать блок программирования.

Для достижения максимальной универсальности ПТК должен обладать удаленным интерфейсом управления. Такое решение позволит системе автоматически программировать прибор учета для дальнейшего запуска критических тестов, а также применять ночное тестирование.

Структурная схема разработанного программно-технического комплекса представлена на рис. 1.

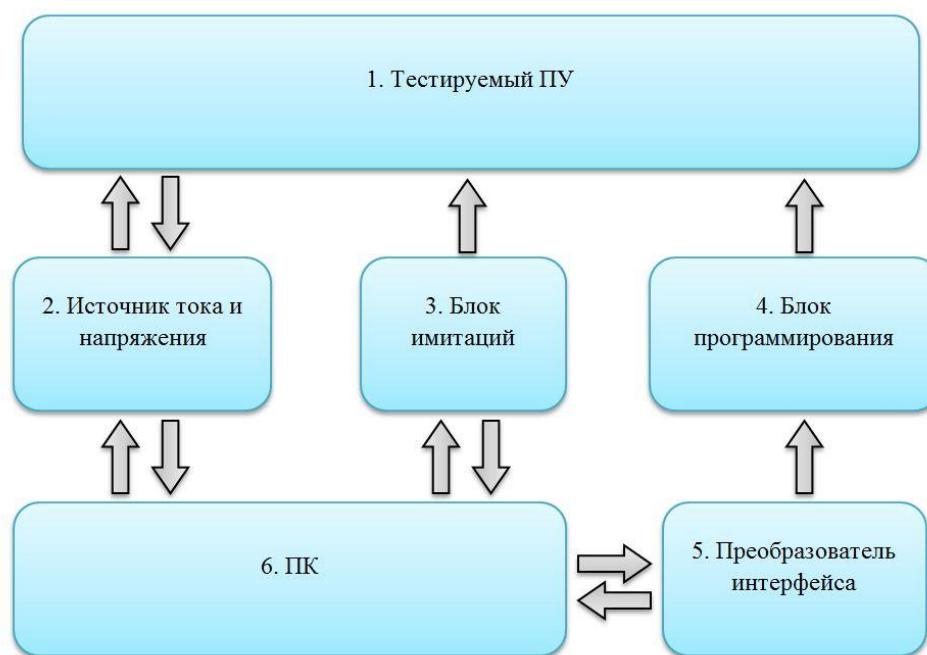


Рис. 1. Структурная схема ПТК

В качестве источника тока и напряжения был выбран прецизионный источник фиктивной мощности OMICRON CMC 256 plus.

Обнаружение наличия вскрытия крышек корпуса и клеммника, воздействия постоянным магнитным полем, сбоя работы модулей связи производится путем установки определенного логического уровня на соответствующий вывод микропроцессора ИПУ. Для имитации данных условий достаточно использовать электромеханические реле. В качестве управления имитаторами был выбран модуль ввода-вывода MB-01, производства НПО «МИР».

Для перепрограммирования приборов учета был разработан программатор. Данное устройство подключается к ИПУ через сервисный разъем и к компьютеру по интерфейсу RS-232. Для удаленного программирования, управления и конфигурирования ИПУ через оптический порт используется преобразователь интерфейсов MOXA NPort 5250A.

Для быстросъемного соединения тестируемых приборов учетов со стендом была разработана коммутационная плата, рис. 2. Перед началом тестирования производится доработка ИПУ с внедрением в его конструкцию диагностического разъема.



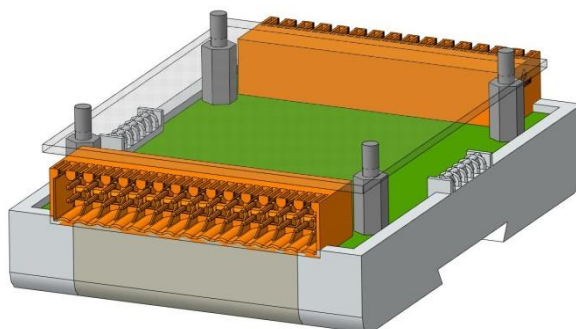


Рис. 2. Плата коммутационная

Для проверки разработанного технического решения был собран макет ПТК, который представлен на рис. 3.

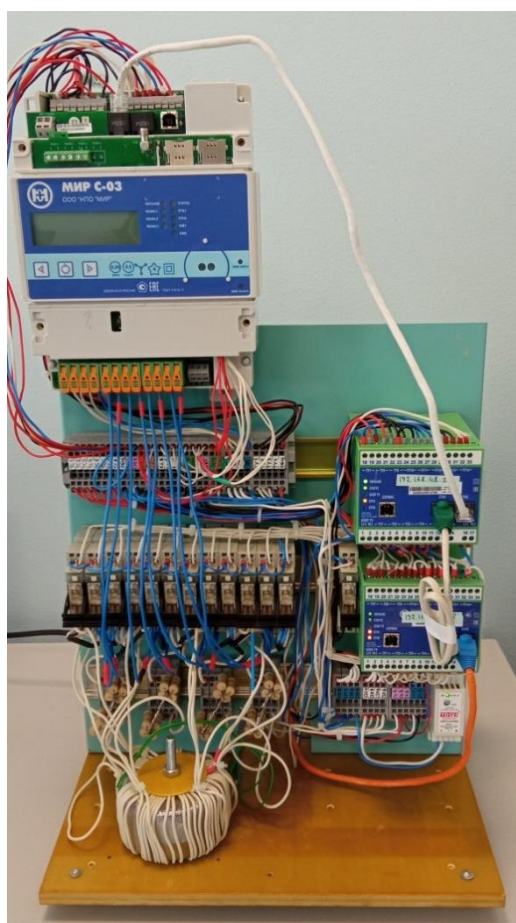


Рис. 3. Макет ПТК

## V. Заключение

Применение разработанного ПТК в производстве при разработке и изменении программного обеспечения ИПУ позволит уменьшить количество пропусков дефектов и сократить время тестирования. Также, это значительно уменьшит нагрузку на инженеров по тестированию, что позволит увеличить степень покрытия тестами функционала приборов учета, тем самым повысив качество выпускаемой продукции.

Макет показал, что реализация всех требуемых характеристик возможна. В настоящее время идет разработка промышленного образца стенда.

Научный руководитель: Алексей Александрович Губарев, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Горбатенко Н. А. Цифровизация электроэнергетики России // Вестник науки и образования. 2020. № 6-2 (84). С. 5–8.
2. Дышлевский В. А. Причины отказов микроконтроллеров и способы повышения их безотказности // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сборник статей по материалам ХСVII студенческой международной научно-практической конференции. Н.: ООО «Сибирская академическая книга», 2021. С. 78-86.
3. Заявка 215473 Российская Федерация, МПК U1 G01R 35/04 Стенд тестирования приборов учета электроэнергии / Теплых И. М. № 2022115277; заявл. 06.06.2022; опубл. 14.12.2022, Бюл. № 35.

*Дата поступления статьи: 06.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. А. Дышлевский, 2023

УДК 621.372.5

*Н. М. Жилин*

Омский государственный университет, г. Омск, Россия

## ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРОВ НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

**Аннотация.** На основе литературных данных рассматриваются примеры конструкций фильтров на основе резонаторов на объемных акустических волнах. Представлены преимущества и недостатки конструкций фильтров лестничных, мостовых, этажерочных, на связанных резонаторах и гибридных схем и их сравнение.

**Ключевые слова:** объемные акустические волны, резонаторы, фильтры.

### 1. Введение

Радиочастотные фильтры являются одним из ключевых компонентов любой системы связи. Эти фильтры требуются для выделения или отклонения определенного частотного диапазона. Сегодня большая часть полос частот занята телевизионным вещанием, мобильной телефонией, технологией Bluetooth, беспроводными локальными сетями, а также промышленными и военными устройствами [1]. Для избежания помех между устройствами необходимы высокоселективные фильтры, поддерживающие запас безопасности между двумя соседними полосами частот. Фильтр на основе резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ) имеет преимущества перед другими фильтрами, такие как: малые габариты, низкие вносимые потери и широкий диапазон рабочих частот (от 0,5 ГГц до 30 ГГц) [2].

В конструкциях фильтров используются электрические или акустические соединения различных резонаторов, настроенных на определенные частоты, чтобы обеспечить желаемое затухание в пределах желаемой ширины полосы и полосы задерживания [2]. Классификация

полосовых фильтров на основе ОАВ-резонаторов представлена на рис. 1. Каждый из представленных типов фильтров имеет свои достоинства, учитываемые при их проектировке, изготовлении и последующем использовании в устройствах радиотехники.

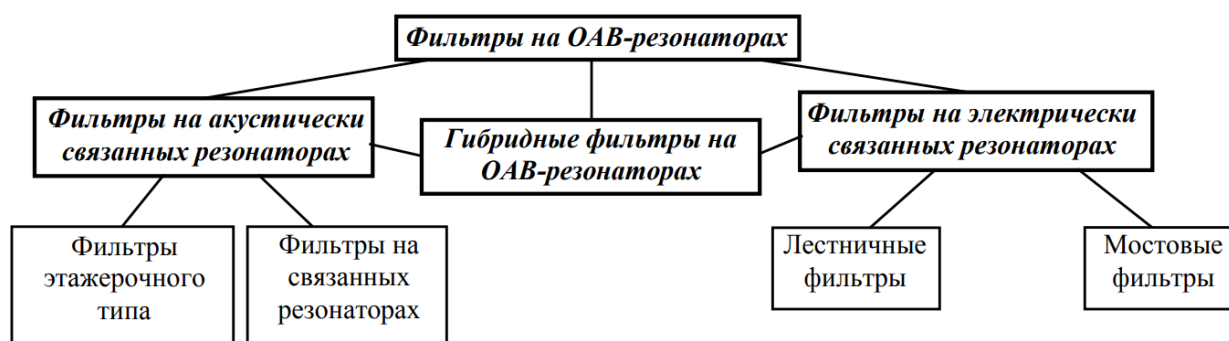


Рис. 1. Классификация полосовых фильтров на микроэлектронных ОАВ-резонаторах

## II. Постановка задачи

Целью данной работы является литературный обзор типов фильтров на основе резонаторов на ОАВ. Задачами данной работы являются.

1. Обзор типов и структур фильтров на ОАВ.
2. Сравнение характеристик структур фильтров.
3. Анализ результатов сравнения.

## III. Теория

Резонаторы на объемных акустических волнах, используемые в построении фильтров, изготавливаются по 4 конструкциям:

- многочастотный резонатор, состоящий из верхнего электрода, пьезоэлектрической пленки и нижнего электрода, расположенных непосредственно на подложке толщиной в несколько раз превышающей суммарную толщину пленок;
- резонатор мембранного типа с использованием дополнительной пленки – стоп-слоя и созданием канавки под резонатором вытравливанием подложки;
- резонатор с воздушным зазором, изготавливаемым с помощью жертвенного слоя под нижним электродом и последующего его уничтожения методом селективного травления;
- резонатор с брэгговским отражателем – многослойной структуре тонких пленок на основе диэлектрической или полупроводниковой подложки, где структура тонких пленок акустически изолирует резонатор от подложки.

Многорезонаторными фильтрами являются фильтры, содержащие в своей структуре более одного резонатора. Такие фильтры называются электрически связанными и их основными конструкциями являются лестничная [3] и мостовая [4] схемы, и соединение резонаторов обеспечивается сваркой проволочных контактов на электродах либо тонкопленочным проводником на электродном слое. Также существует возможность создания фильтра на одном резонаторе, работающем на основной моде резонатора либо на его гармониках. Такой вид фильтров является акустически связанным, например, этажерочный [5] фильтр и фильтр на связанных резонаторах [6]. Отдельным видом фильтров на ОАВ являются гибридные [7] – совмещение электрически и акустически связанных фильтров. Каждый из этих типов фильтров имеет свои преимущества, используемые для решения различных задач радиотехники.

Наиболее распространенными схемами фильтров на электрически связанных резонаторах являются лестничные и мостовые структуры. Конструкция связи таких фильтров представлена на рис. 2, где 1 – подложка резонатора, 2 – акустический отражатель,

3 – пленка пьезоэлектрического слоя, 4 – электроды, включающие в себя контактные площадки, 5 – проволочные проводники. В настоящее время наиболее распространенным типом фильтров является лестничный в силу наиболее простой технологии изготовления.

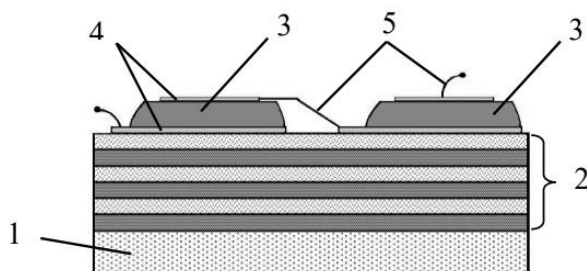


Рис. 2. Конструкция звена фильтра лестничного или мостового типа

Одним из основных преимуществ лестничной схемы фильтра является малые потери в полосе пропускания (до 1,6 дБ). Также к преимуществам относится малая чувствительность к изменениям и отклонениям параметров резонаторов, а также имеется возможность управления амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) фильтра с целью ее улучшения катушками индуктивности. Однако такая схема имеет малые затухания в полосе задерживания.

Мостовые фильтры на ОАВ обеспечивают наиболее компактное расположение элементов фильтра [7]. В отличие от лестничной схемы, мостовая имеет большое затухание в полосе задерживания, но более чувствительна к отклонениям параметров резонатора. В связи с этим получение оптимальной АЧХ требует прецизионного подбора резонаторов, в противном случае увеличиваются вносимые потери в полосе пропускания.

Этажерочный тип фильтров, являющийся частным случаем фильтров на акустически связанных резонаторах, представлен на рис. 3, где 1, 2, 3, 7 – электроды, 4 – подложка фильтра, 5 – акустический отражатель, 6 – пьезоэлектрические слои. Особенностью конструкции такого фильтра является общий электрод вследствие размещения преобразователей друг над другом, и основой АЧХ фильтра служит ограниченный частотный диапазон внешнего нагруженного фильтра [5]. Преимуществом такого фильтра является возможность использования резонаторов с низкой добротностью Q, но увеличенное количество слоев тонких пленок и необходимость дополнительных итераций их травления значительно усложняет технологию производства фильтра.

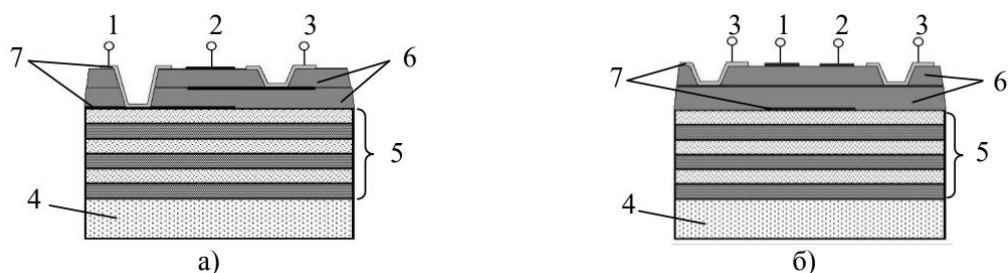


Рис. 3. Конструкция фильтра этажерочного типа: а) два пьезоэлектрических слоя с электродами, представляющие собой одно звено однополюсного фильтра; б) два последовательно соединенных звена, образующие двухполюсный фильтр

Отличительная черта этажерочных фильтров – их построение на одном резонаторе. Есть два основных режима работы таких фильтров: на основной моде, в этом случае оптимизация электрических связей и путей не требуется, либо на гармониках. Особенность такого фильтра – узкая полоса пропускания фильтра вследствие малого коэффициента

электромеханической связи  $k^2$ . Полосу пропускания можно расширить посредством уменьшения электромеханической связи с помощью акустически связывающих слоев [6]. Такая система будет являться фильтром на связанных резонаторах, и показана на рис. 4, где 1, 1', 2, 2', 8 – электроды, включающие в себя контактные площадки, 3 – акустически активная область; 4 – подложка фильтра; 5 – акустический отражатель; 6 – пьезоэлектрический слой; 7 – связывающие слои. Достоинством таких фильтров является возможность регулирования полосы пропускания посредством связывающих слоев, однако требует еще большее количество дополнительных слоев и их травления по сравнению с этажерочными фильтрами, что еще больше усложняет конструкцию и технологию изготовления, вследствие чего процент брака при их изготовлении повышается.

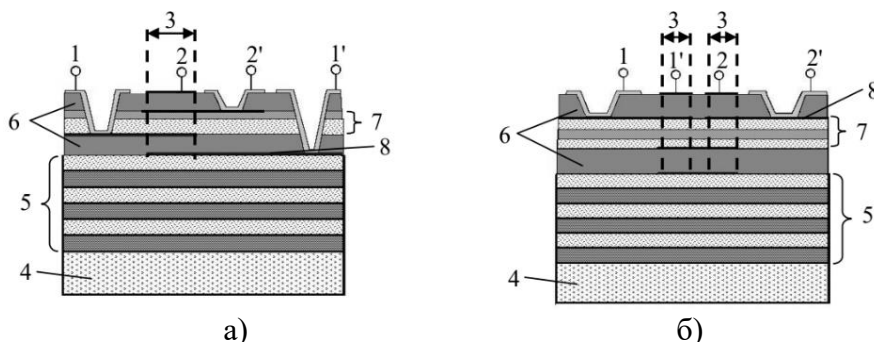


Рис. 4. Конструкция фильтра на связанных резонаторах: а) одно звено фильтра на связанных резонаторах; б) два звена фильтра, которые соединены последовательно

Гибридные фильтры являются совмещением различных типов фильтров с целью улучшения электрических параметров [8]. Такие фильтры чаще всего имеют уменьшенные потери в полосе пропускания, расширенную полосу пропускания, улучшенные затухания в полосе задерживания, однако их создание труднее, чем вышеперечисленных фильтров, благодаря сложности конструкций. Также в системах таких фильтров есть возможность управления АЧХ фильтра с целью ее улучшения катушками индуктивности и емкостью. Примером такого фильтра является совмещение фильтра на связанных резонаторах и лестничной структуры, при которой у итогового фильтра значительно улучшается избирательность.

#### IV. Заключение

Полосовые фильтры на ОАВ активно используются в технологических решениях задач радиотехники. Сравнительные характеристики наиболее распространенных электрически и акустически связанных фильтров представлены в таблице 1. Наиболее предпочтительными фильтрами являются фильтры гибридного типа в связи с возможностью их прецизионной настройки и улучшенных параметров: уменьшенных потерь в полосах пропускания и увеличенных потерь в полосах подавления, ширины полосы пропускания, повышенной избирательности, однако сложной в построении и настройке. Анализ также показал, что лестничная структура фильтра на ОАВ является наиболее простой в изготовлении и, несмотря на недостаток в виде слабых затуханий за полосой пропускания, наиболее активно используемой.

Таблица 1

**Сравнительные характеристики фильтров на резонаторах на ОАВ**

Тип фильтра	Достоинства	Недостатки
Лестничный	- малая чувствительность к изменениям и отклонениям параметров резонаторов; - малые потери в полосе пропускания фильтра	- малое затухание в полосе задерживания

Мостовой	-большое затухание в полосе задерживания; -простая топология фильтра	- большие вносимые потери и высокая чувствительность к параметрам резонаторов
Этажерочный	- возможность использования резонаторов с низкой добротностью	- большое количество слоев; - узкая полоса пропускания
На связанных резонаторах	- возможность управления частотными характеристиками фильтра и полосой пропускания фильтра с помощью связывающих слоев	- увеличение числа слоев в структуре фильтра по сравнению с фильтрами этажерочного типа
Гибридный	- малые вносимые потери в полосе пропускания и улучшенные затухания в полосе задерживания	- сложность в электрических соединениях разных звеньев фильтра

Научный руководитель: Александр Геннадьевич Козлов, Омский государственный технический университет.

#### Библиографический список

1. Bhadauria A., Panchal B., Varghese S. RF Bandpass Filters using FBAR with Fractal Electrodes // CSIR-CEERI, Pilani, Rajasthan, India, 2018. P. 1–3. DOI:10.1109/IMaRC.2018.8877300
2. Гуляев Ю. В., Мансфельд Г. Д. Резонаторы и фильтры сверхвысоких частот на объемных акустических волнах – современное состояние и тенденции развития // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 5-6. С. 13–28.
3. Гуляев Ю. В., Балышева О. Л., Григорьевский В. И. [и др.]. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования. М.: Радиотехника. 2012. 555 с.
4. Clement M., Iborra E., Olivares J., Rimmer N., Giraud S., Bila S., Reinhardt A. DCS Tx Filters Using AlN Resonators With Iridium Electrodes // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2010. P. 518-523. DOI:10.1109/TUFFC.2010.1442.
5. Lakin K. M., Belsick J. R., McDonald J. P., McCarron K. T. High Performance Stacked Crystal Filters for GPS and Wide Bandwidth Applications // IEEE Ultrasonics Symposium Proceeding. 2001. Vol. 1. P. 833–838. DOI:10.1109/ULTSYM.2001.991849.
6. Lakin K. M. Coupled Resonator Filters // Proceeding IEEE International Ultrasonics Symposium. 2002. Vol. 1. P. 901-908. DOI:10.1109/ULTSYM.2002.1193543.
7. Hashimoto K. RF Bulk Acoustic Wave Filters for Communications. MA: Artech House, 2009. 292 p. ISBN-13:978-1596933217.
8. Dolle H. K. J., Lobeek J. W., Tuinhout A., Foekema J. Balanced Lattice-Ladder Bandpass Filter in Bulk Acoustic Wave Technology // IEEE MTT-S Digest. 2004. Vol. 1. P. 391-394. DOI:10.1109/MWSYM.2004.1335904.

*Дата поступления статьи: 28.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Н. М. Жилин, 2023

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрен процесс автоматических измерений пульсаций выходного напряжения преобразователей постоянного напряжения с помощью цифрового осциллографа. Выявлены основные проблемы, возникающие при автоматических измерениях пульсаций. Представлен алгоритм, позволяющий автоматически измерять размах пульсаций напряжения с высокой точностью.

**Ключевые слова:** автоматические измерения, цифровой осциллограф, размах пульсаций напряжения, преобразователь постоянного напряжения, развертка.

### I. Введение

Многие современные системы содержат в своем составе несколько преобразователей напряжения для обеспечения питания составных элементов. К параметрам выходного напряжения этих преобразователей предъявляются жесткие требования. Например, такой параметр, как размах пульсаций выходного напряжения, является решающим при оценке работоспособности системы в целом [1].

Пульсации выходного напряжения есть у всех преобразователей постоянного напряжения (ППН). Они возникают при заряде и разряде выходного конденсатора в соответствии с импульсами энергии от внутреннего генератора [2]. Частота этих колебаний зависит от топологии и может быть равной основной частоте преобразования или ее удвоенному значению, обычно в диапазоне 100-200 кГц. Кроме того, на эти колебания накладываются короткие выбросы напряжения в виде затухающих колебаний с гораздо более высокой частотой, обычно в диапазоне десятков мегагерц [3]. Пример осциллограммы пульсаций выходного напряжения представлен на рис. 1.

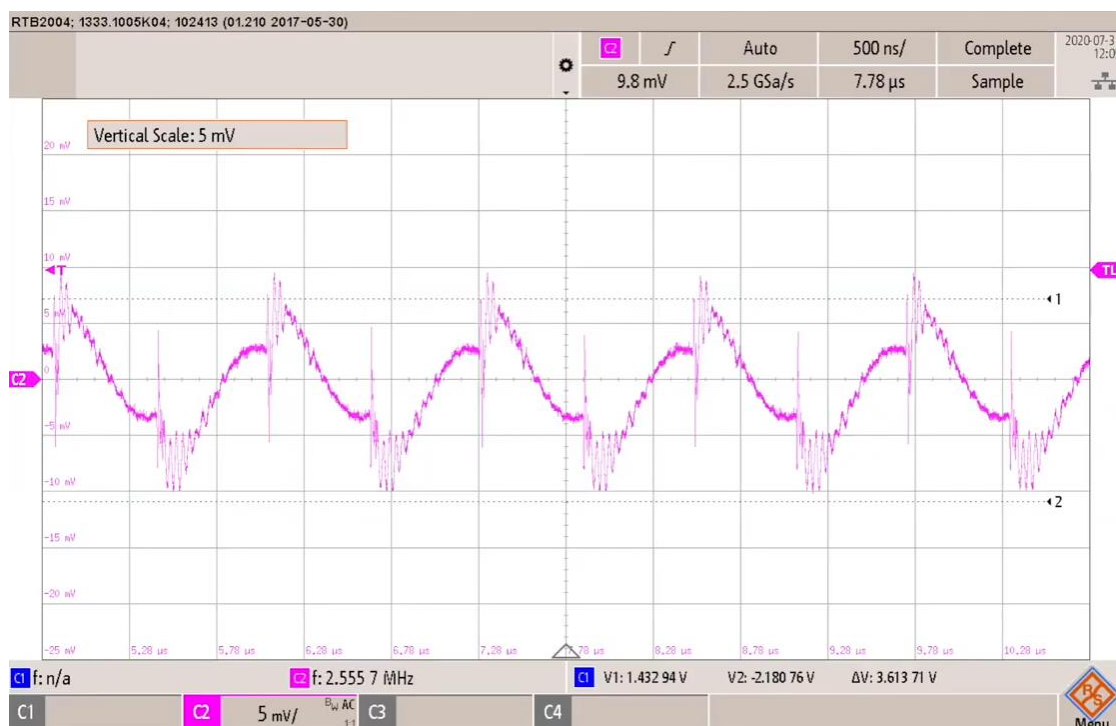


Рис. 1. Осциллограмма пульсаций выходного напряжения ППН



Для измерения параметров пульсаций выходного напряжения ППН может применяться один из приборов: мультиметр, осциллограф или анализатор спектра. Мультиметр используется для измерения среднего значения пульсаций напряжения на выходе преобразователя, что позволяет оценить уровень пульсаций. Осциллограф позволяет наблюдать форму выходного напряжения преобразователя, а также измерять его амплитудные и временные параметры. Для измерения высокочастотных пульсаций, используется специализированный измерительный прибор, такой как анализатор спектра. Он позволяет рассмотреть спектральный состав пульсаций напряжения.

## **II. Постановка задачи**

Рассмотрим последовательность действий человека, измеряющего размах пульсаций выходного напряжения ППН в ручном режиме с помощью цифрового осциллографа.

1. Настроить полосу пропускания осциллографа для используемого канала. Например, при измерении пульсаций выходного напряжения модулей питания выбирается полоса пропускания 20 МГц, так как в этой полосе регламентируется уровень помех.

2. Установить связь по переменному току.

3. Отключить функцию фильтрации высоких частот.

4. Подключить измерительный щуп осциллографа к выходу ППН. Следует помнить, что контур заземляющего щупа осциллографа должен быть минимальным, чтобы не наводились радиопомехи.

5. Включить ППН на минимальном входном напряжении и максимальном токе.

6. Установить положение триггера так, чтобы исследуемый сигнал пересекал линию триггера в нескольких местах, а также отсутствовало колебание изображения.

7. Настроить развертку по вертикальной оси так, чтобы изображение на дисплее осциллографа было четким.

8. Настроить развертку по горизонтальной оси так, чтобы можно было наблюдать несколько периодов пульсаций напряжения.

9. Измерить размах пульсаций напряжения с помощью встроенной функции «пик-пик».

В ручном режиме человек по отображаемому на дисплее осциллографа сигналу с легкостью выставляет триггер и настраивает развертку по осям. Для автоматического режима необходимо разработать такой алгоритм, который, не видя сигнал, правильно выставит триггер, и настроит развертку по осям для измерения размаха пульсаций выходного напряжения ППН.

## **III. Разработка алгоритма автоматического измерения пульсаций напряжения**

В алгоритме используется встроенная в цифровой осциллограф функция «автомасштаба». Данная функция позволяет установить триггер по среднему значению сигнала и корректно выставить развертку по вертикальной оси. Однако по горизонтальной оси развертка выставляется неверно. В большинстве случаев осциллограф устанавливает ее так, что на дисплее видна только часть одного периода пульсаций напряжения.

Поэтому для правильной установки развертки по горизонтальной оси необходимо использовать информацию о частоте преобразования ППН. Предлагается рассчитывать развертку как один период преобразования на деление. Например, для модуля с частотой преобразования 300 кГц, развертка будет составлять 3,33 мкс/деление. Это позволяет увидеть несколько периодов пульсаций напряжения на дисплее осциллографа.

После выполнения вышеперечисленных действий на дисплее осциллографа всегда наблюдается устойчивая картина пульсаций напряжения, по которой можно измерять размах пульсаций напряжения с помощью встроенной в осциллограф функции «пик-пик».

Для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения, значение размаха пульсаций напряжения необходимо измерить несколько раз, далее с помощью критерия Граббса исключить грубые погрешности и для полученной выборки произвести оценку начального момента первого порядка.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма автоматического измерения пульсаций напряжения ППН

## VI. Заключение

Разработанный алгоритм был протестирован на цифровых осциллографах Agilent DSO5032A, GWINSTEK GDS-73252 для различных ППН и показал свою работоспособность. Он может быть использован в любой автоматической системе, которая отправляет команды цифровому осциллографу, для измерения размаха пульсаций выходного напряжения ППН.

Научный руководитель: Наталия Олеговна Голубятникова, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Кадацкий А. Ф., Малявин И. П., Кочетков А. В., Швец О. В. Анализ электрических процессов в МИП постоянного напряжения при граничных токах дросселей // Научные труды ОНАЗ им. О. С. Попова. 2010. № 1. С. 20–30.
2. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование.: Пер. с англ. К.: МК-Пресс, 2007. 288 с.
3. Roberts S. DC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User. RECOM Second Edition, 2015. 234 с.

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 08.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© С. В. Иксанов, 2023

УДК 621.317

С. В. Иксанов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «ОНИИП», г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЕЙ ПИТАНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрен процесс проектирования автоматической системы для предъявительских и приемо-сдаточных испытаний модулей питания. Определены достоинства автоматического и недостатки ручных методов испытаний. Представлена аппаратная часть системы на структурном уровне. Описаны функции и особенности программного обеспечения системы. Спроектированная автоматическая система позволяет повысить точность измерений и сократить время испытаний более чем в 5 раз.

**Ключевые слова:** автоматическая система, модуль питания, приемо-сдаточные испытания, измерение электрических параметров, программное обеспечение, протокол TSP, последовательный порт.

## I. Введение

От качества модулей питания зависит надежность аппаратуры, в которой они применяются. Поэтому проведение испытаний является важным этапом в процессе производства [1]. Испытания одного модуля питания на соответствие электрическим

параметрам в неавтоматическом режиме занимает около одного часа. Это связано с тем, что требуется произвести измерение выходных параметров модуля питания, таких как выходное напряжение, выходной ток, пульсации выходного напряжения, для различных режимов работы. Модуль питания испытывается при номинальном входном напряжении, при скачкообразном изменении входного напряжения, при изменении выходного тока, в режиме холостого хода и после воздействия короткого замыкания. Помимо этого, необходимо произвести промежуточные вычисления переходного отклонения выходного напряжения, суммарной нестабильности выходного напряжения и др.

Автоматические измерения имеют множество преимуществ перед неавтоматическими (ручными). Во-первых, отсутствуют ошибки, возникающие из-за человеческого фактора, так как человек исключается из процесса измерения. Во-вторых, повышается быстродействие. Автоматическая система может производить измерение нескольких параметров одновременно. Для дальнейшего повышения быстродействия она может быть масштабирована. В-третьих, система позволяет автоматически документировать результаты измерений, что обеспечивает возможность контроля и анализа результатов в будущем.

По результатам проведенного обзора были найдены две российские компании, которые предлагают стенды для автоматических испытаний производимых ими модулей питания. Стенд измерительный тестирования параметров модулей питания SP-4000 предназначен для автоматизированной проверки параметров модулей питания на различных этапах испытаний [2]. Стенды поверочные МДМ-120М и МДМ-480М разработаны в виде чемоданчиков для проверки электрических параметров модулей питания, выпускаемых компанией [3, 4]. Информацию об аппаратной и программной реализации стендов найти не удалось.

## **II. Постановка задачи**

Для проведения предъявительских и приемо-сдаточных испытаний модулей питания нескольких серий, которые отличаются друг от друга измеряемыми параметрами и методиками проведения испытаний, была поставлена задача спроектировать автоматическую систему испытаний модулей питания.

В состав системы должны входить следующие основные компоненты: персональный компьютер (ПК), принтер, коммутатор, пульт, источник постоянного тока N5751A или N5767A, осциллограф GDS-73252, нагрузка электронная программируемая АТН-8030 или Chroma 63103A и программное обеспечение.

Программное обеспечение (ПО) должно:

- обеспечивать возможность введения предварительных настроек оператором;
- обеспечивать проведение испытаний с измерением и расчетом параметров модулей питания в автоматическом режиме согласно настройкам, введенным оператором;
- управлять работой источника питания, осциллографа, электронной нагрузки и пульта в процессе проведения испытаний;
- управлять процессом измерения параметров модулей питания в соответствии с заданной методикой испытаний;
- обеспечивать возможность отображения этапа испытаний с измеренными и рассчитанными параметрами модулей питания;
- позволять сохранять измеренные и рассчитанные параметры модулей питания, а также все настройки испытаний в виде набора файлов.

## **III. Проектирование системы**

Структурная схема системы испытаний модулей питания представлена на рис. 1.

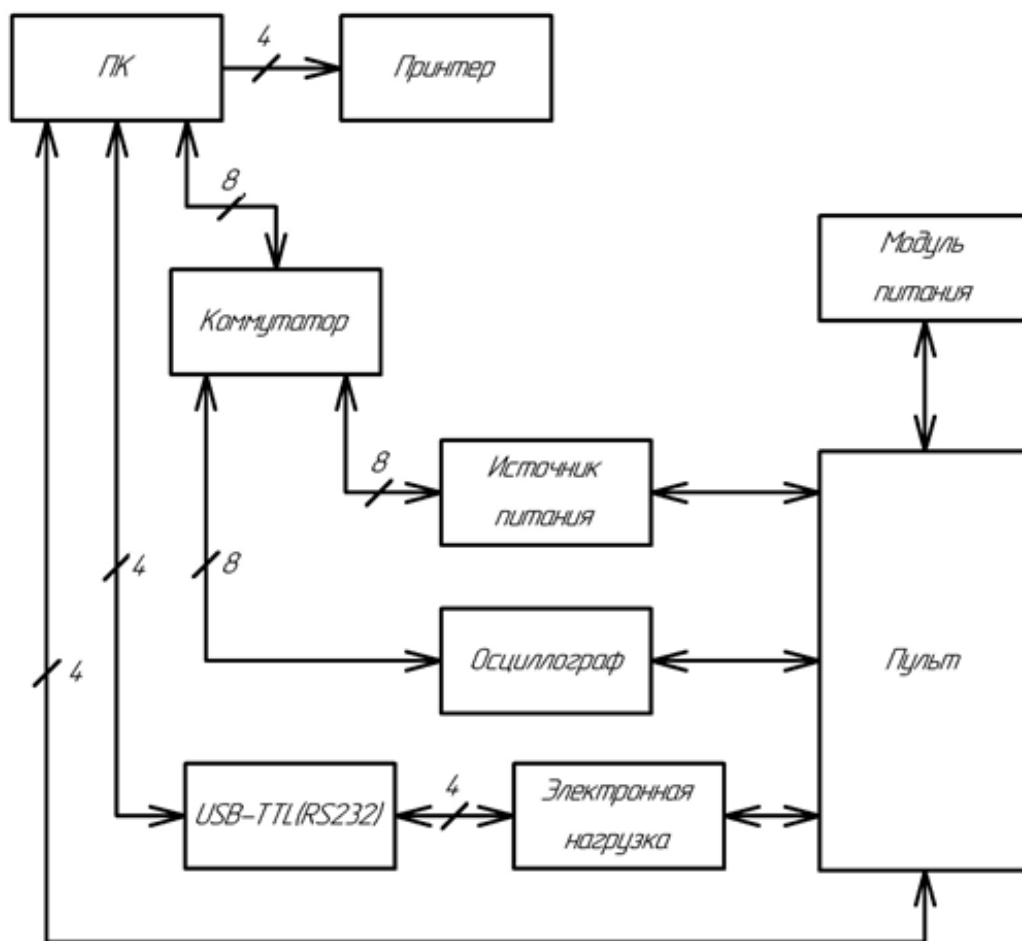


Рис. 1. Структурная схема системы

На пульте размещены разъемы для подключения модуля питания, источника питания, осциллографа, электронной нагрузки и ПК.

Управляющие функции выполняет ПО, установленное на ПК. Пульт принимает команды от ПК на включение (выключение) модуля питания и замыкание реле для установки (снятия) короткого замыкания на выходе модуля.

Алгоритм работы управляющей программы, которая проводит измерения и сохраняет их в файл, представлен на рис. 2.

ПК, осциллограф и источник питания связаны в локальную сеть с помощью сетевого коммутатора. Поэтому предварительно средства измерения необходимо правильно настроить: установить IP-адрес и порт [5]. Взаимодействие с ними осуществляется с помощью протокола TCP через интерфейс сокетов. Осциллограф и источник питания могут управляться командами из стандарта IEEE-488. Пример отправки команды «\*IDN?» через интерфейс сокета представлен на рис. 3.

Электронная нагрузка управляется через последовательный порт. Для конфигурации оборудования с нагрузкой АТН-8030 используется преобразователь интерфейсов USB в TTL; для конфигурации с Chroma – USB в RS-232. Отличия в этих конфигурациях также в том, что АТН-8030 управляется с помощью протокола Modbus, а Chroma командами из стандарта IEEE-488. Пример отправки команды «\*IDN?» через последовательный порт на нагрузку Chroma представлен на рис. 4.

На рис. 5 представлен пример считывания напряжения на нагрузке Chroma.

На рис. 6 представлен пример установки тока на нагрузке Chroma.

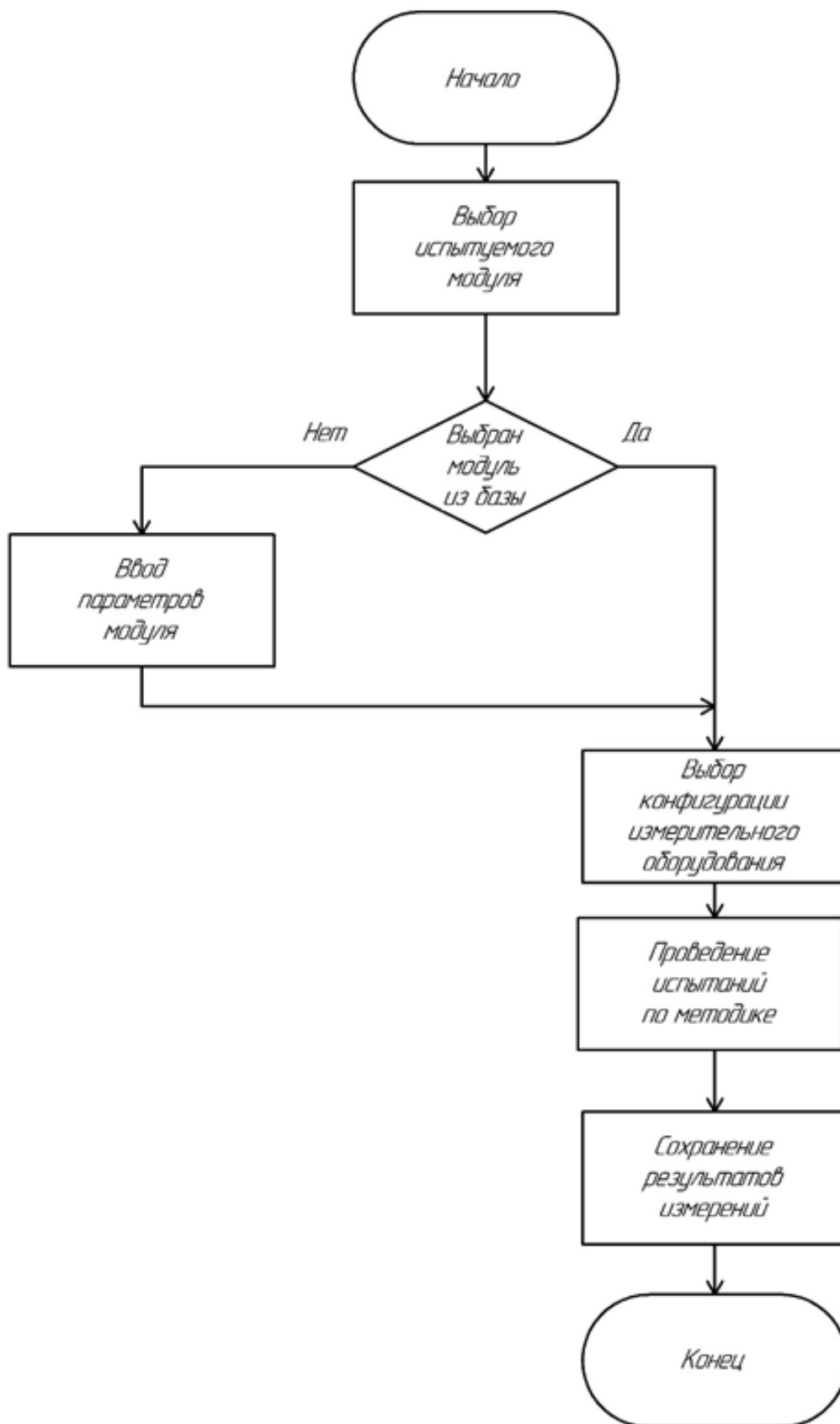


Рис. 2. Алгоритм работы управляющей программы

```

socket->connectToHost(ip, port); // подключаемся по ip и порту
socket->write("**IDN?\n"); // отправляем команду на проверку что за устройство
socket->waitForBytesWritten(); // ждем пока отправится
socket->waitForReadyRead(); // ждем пока будет доступен ответ
name = socket->readAll(); // читаем все, что прислали

```

Рис. 3. Пример отправки команды для идентификации устройства на указанный IP-адрес

```

serialport.open(QIODevice::ReadWrite); // открываем порт
serialport.write("**IDN?\n"); // отправляем команду IDN
serialport.waitForBytesWritten(2000); // ждем пока запишется команда
delay(1);
serialport.waitForReadyRead(1000); // ждем готовности чтения
name = serialport.readAll(); // читаем имя прибора

```

Рис. 4. Пример отправки команды для идентификации устройства через последовательный порт

```

float Load::get_voltage(void) {
    serialport.write(":MEAS:VOLT?\n"); // измеряем напряжение на нагрузке
    serialport.waitForBytesWritten(2000); // ждем пока отправится
    delay(1);
    serialport.waitForReadyRead(1000); // ждем готовности чтения
    QString load_voltage_str = serialport.readAll(); // читаем ответ нагрузки

    load_voltage_str.remove('\n'); // удаляем символ переноса строки из принятого сообщения
    // конвертируем в строку ответ
    QByteArray ba = load_voltage_str.toLocal8Bit();
    const char *load_voltage_ch = ba.data();
    float load_voltage = atof(load_voltage_ch); // конвертируем строку в число

    return load_voltage;
}

```

Рис. 5. Пример считывания напряжения с нагрузки Chroma

```

void Load::set_current(float current) {
    if (current < 0.1) { // если задаваемый ток меньше 100 мА
        set_mode("CCL"); // ставим режим CCL
        delay(1);
    }
    else {
        set_mode("CCH"); // если больше, то CCH
        delay(1);
    }
    QString c = QString::number(current, 'f', 3); // конвертируем передаваемое число в строку
    QString reqs = QString(":CURR:STAT:L1 %1\n").arg(c); // форматируем запрос
    // переводим QString в строку
    QByteArray ba = reqs.toLocal8Bit();
    const char *req = ba.data();
    serialport.write(req); // отправляем запрос на нагрузку
    serialport.waitForBytesWritten(2000); // ждем пока запишется
}

```

Рис. 6. Пример задания тока нагрузки на электронной нагрузке



## VI. Заключение

Разработанная система позволяет проводить предъявительские и приемо-сдаточные испытания модулей питания в автоматическом режиме. Для испытаний одного модуля питания системе требуется 10 минут. То есть скорость испытаний в автоматическом режиме увеличивается более, чем в 5 раз. Также повышается точность, так как исключаются ошибки из-за человеческого фактора. В конце испытаний система формирует протокол испытаний на каждый модуль питания.

Научные руководители: Дмитрий Викторович Лазарев, Омский НИИ приборостроения, Наталия Олеговна Голубятникова, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Данилов А. Д., Минеев В. А. Разработка алгоритмов процесса тестирования для программно-аппаратного комплекса климатических испытаний модулей электропитания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, № 1. С. 32-36.
2. Стенды измерительные тестирования параметров модулей питания SP-4000 URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/379525> (дата обращения 28.03.2023).
3. Стенд поверочный МДМ-120М URL: <https://aeip.ru/production/aksessuary/stend-proverochnyu-mdm-120m/> (дата обращения 28.03.2023).
4. Стенд поверочный МДМ-480М URL: <https://aeip.ru/production/aksessuary/stend-proverochnyu-mdm-480m/> (дата обращения 28.03.2023).
5. Лапин А. А. Интерфейсы. Выбор и реализация. М.: Техносфера, 2005. 168 с.

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 08.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© С. В. Иксанов, 2023

УДК 621.316

*Н. И. Кульков, И. В. Хоменко*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### **ФИЛЬТР ГАРМОНИК ДЛЯ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА**

**Аннотация.** Показана возможность упрощения разработки фильтра гармоник для радиопередатчика на несколько поддиапазонов частот выходной фильтрующей системы, состоящей из нескольких фильтров гармоник – диплексеров. Выбрав фильтр прототип для эллиптического фильтра только одного поддиапазона, можно его использовать для других поддиапазонов с таким же коэффициентом перекрытия по частоте. Представлен анализ графиков амплитудно-частотной характеристики и коэффициента стоячей волны по напряжению полученной схемы. Проведена экспериментальная оценка результатов

исследования. Даны практические рекомендации по проектированию фильтров гармоник с одинаковым коэффициентом перекрытия каждого поддиапазона.

**Ключевые слова:** гармоники, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент стоячей волны по напряжению.

## I. Введение

В усилителях мощности высокой частоты, используемых в оконечных каскадах радиопередающих устройств, важными параметрами являются выходная мощность и коэффициент полезного действия (КПД). Для получения необходимой выходной мощности с высоким КПД усилительные элементы работают в нелинейных режимах. Нелинейный режим работы приводит к появлению в спектре сигнала гармоник основного сигнала. В результате уменьшение уровня гармоник высших порядков на сегодняшний день является одной из актуальных задач. Целью данной работы является проектирование и исследование фильтра гармоник (ФГ) для радиопередающего устройства (РПДУ) коротковолнового (КВ) диапазона с выходной мощностью 250 Вт. При этом за основу берется схема одного из поддиапазонов с последующей трансформацией реактивных составляющих на другие поддиапазоны ФГ.

## II. Постановка задачи

Для достижения цели надо решить следующую задачу, спроектировать ФГ, обеспечив уровень подавления гармоник на выходе фильтра  $-40 \pm 2$  дБ.

Частотный диапазон: 1,5 – 30 МГц, 6 поддиапазонов.

Уровни ослабления гармоник на выходе усилителя мощности (УМ) и ФГ представлены в таблице 1. В данной таблице показано, какое ослабление имеет та или иная гармоника после прохождения сигнала через УМ и какого ослабления, соответственно, необходимо добиться после прохождения сигнала через ФГ.

Таблица 1

**Уровень гармоник после УМ и ФГ**

№ гармоники	2	3	4	5
После УМ	-36 дБ	-12 дБ	-38 дБ	-18 дБ
После ФГ	-6 дБ	-30 дБ	-4 дБ	-24 дБ

Необходимо рассчитать коэффициент перекрытия полного диапазона  $K_p$ , по формуле 1 и коэффициент перекрытия для каждого поддиапазона  $K_{pd}$ , по формуле 2. Это необходимо для расчёта частотных границ каждого поддиапазона.

$$K_p = \frac{f_{MAX}}{f_{MIN}} = \frac{30}{1,5} = 20, \quad (1)$$

$$K_{pd} = K_p^{1/n} = 20^{1/6} \approx 1,65, \quad (2)$$

где  $f_{MAX}$  – верхняя частота диапазона;  $f_{MIN}$  – нижняя частота диапазона;  $n$  – количество поддиапазонов.

Расчёт нижней полосы (НП) частотной границы каждого поддиапазона происходит по формуле 3 и верхней полосы (ВП) по формуле 4 [1]. Результаты представлены в таблице 2.

$$K_{pd}^{НП} = (K_{pd})^{n-1} * f_{MIN}, \quad (3)$$

$$K_{pd}^{ВП} = (K_{pd})^n * f_{MIN} \quad (4)$$

Частотные границы поддиапазонов

№ поддиапазона	1	2	3	4	5	6
НП, МГц	1,500	2,472	4,074	6,714	11,064	18,234
ВП, МГц	2,472	4,074	6,714	11,064	18,234	30,049

При проектировании всего устройства достаточно провести расчет одного поддиапазона ФГ и его результаты можно будет трансформировать на другие поддиапазоны. В каждом из таких поддиапазонов получим аналогичные электрические параметры.

Схема 1-го поддиапазона ФГ в среде AWR [2] представлена на рис. 1. Схема представляет собой диплексер, состоящий из эллиптического фильтра нижних частот (ФНЧ) и фильтра верхних частот (ФВЧ) 3-го порядка.

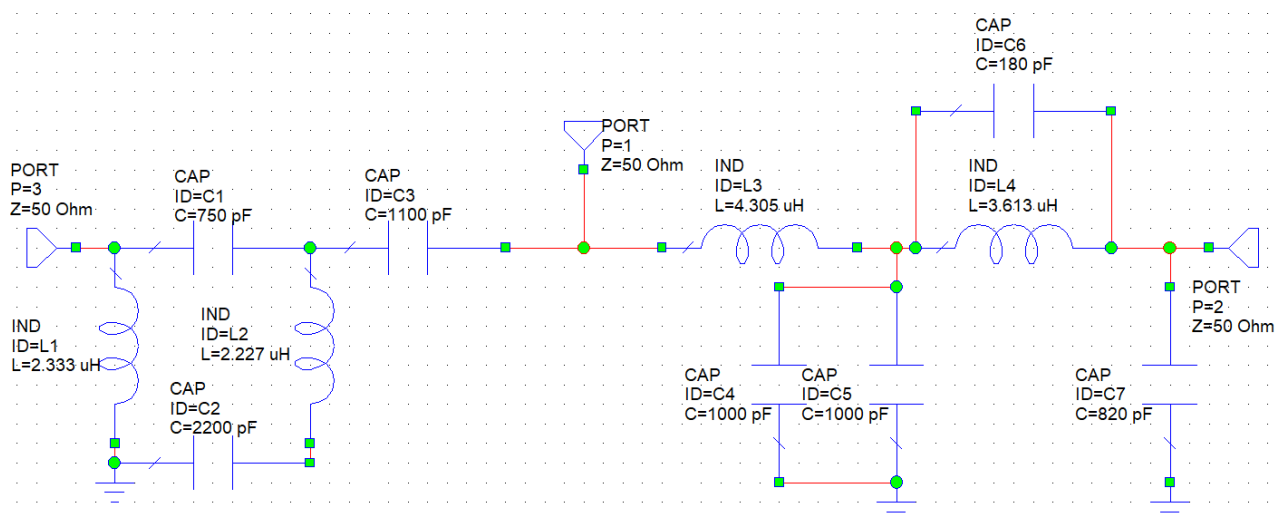


Рис. 1. Схема 1-го поддиапазона ФГ

Графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ФНЧ, ФВЧ и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для 1-го поддиапазона представлены на рис. 2. Данные графики получены в САПР «AWR Microwave Office», где ось VSWR – это КСВН, Attenuation – ослабление в дБ, Frequency – частота в МГц.

Требуемыми условиями являются: подавление гармоник после ФГ, представленных в таблице 1, на соответствующих частотах, КСВН для ФНЧ должен быть не более 1,15, КСВН для ФВЧ не более 1,5.

Из характеристики видно, что на границе полосы пропускания поддиапазона ослабление не превышает -0,01251 дБ, ослабление гармонических составляющих на частоте  $2F_c$  -6,19 дБ,  $3F_c \dots 5F_c$  -30 дБ, где  $F_c$  – частота соответствующая нижней полосе частотной границы каждого поддиапазона ФГ. Остальные пять поддиапазонов имеют аналогичные характеристики.

Для разработки рабочего макета фильтра, был выбран 1 поддиапазон. Трассировка печатной платы, представлена на рис. 3.

Собранный макет устройства представлен на рис. 4

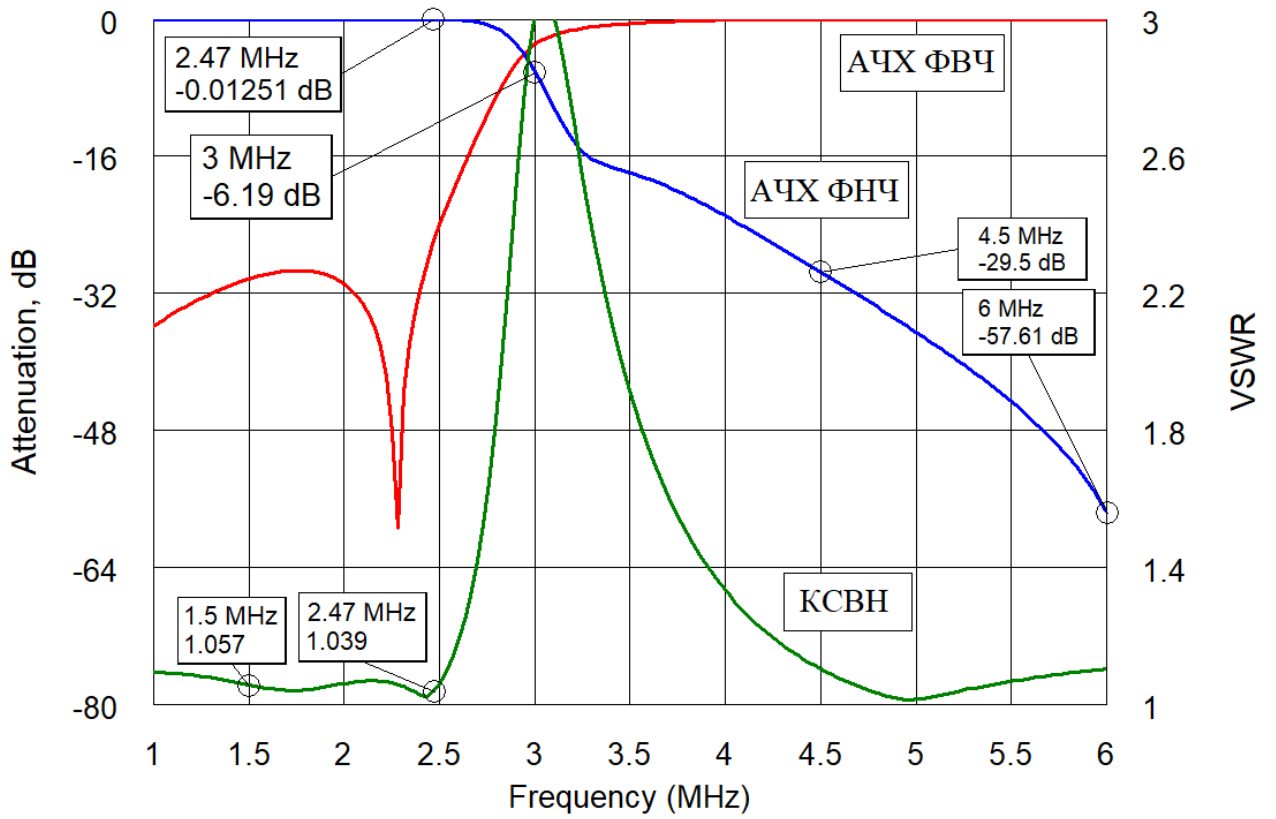


Рис. 2. Графики АЧХ ФНЧ, ФВЧ и КСВН

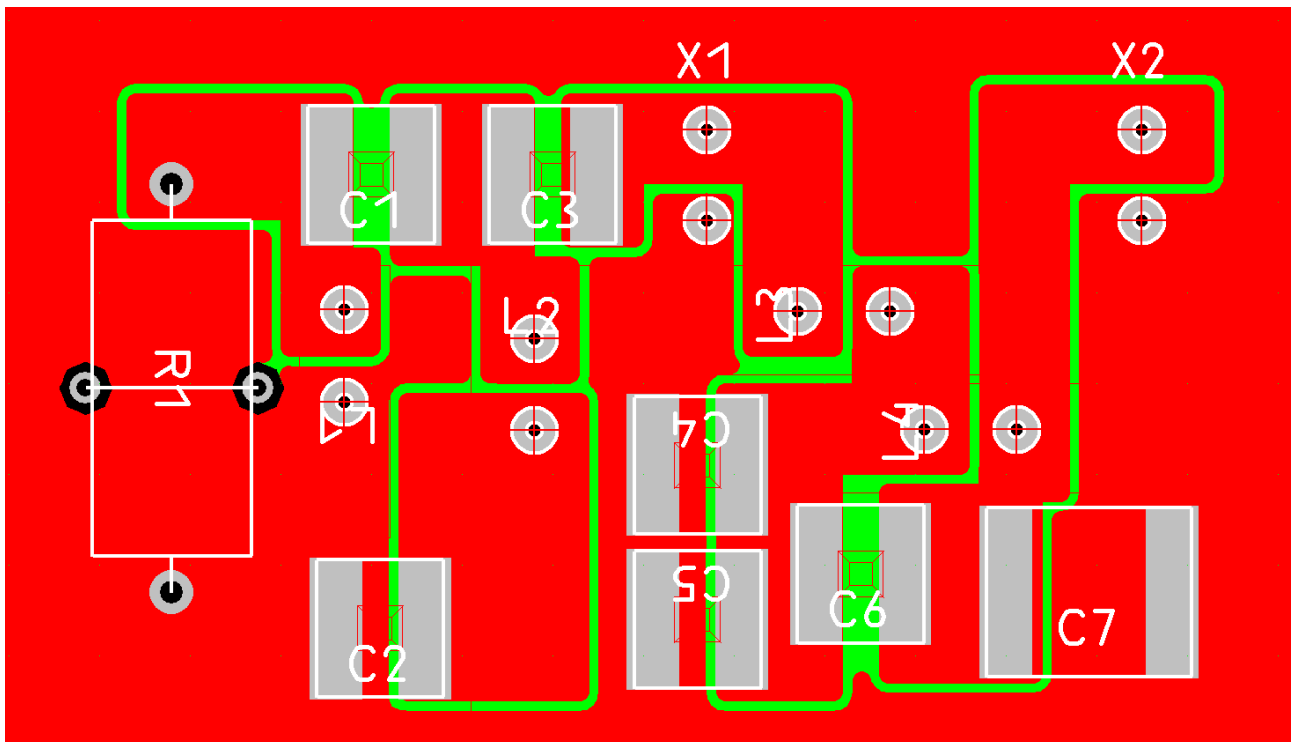


Рис. 3. Трассировка платы ФГ 1-го поддиапазона в системе P-CAD

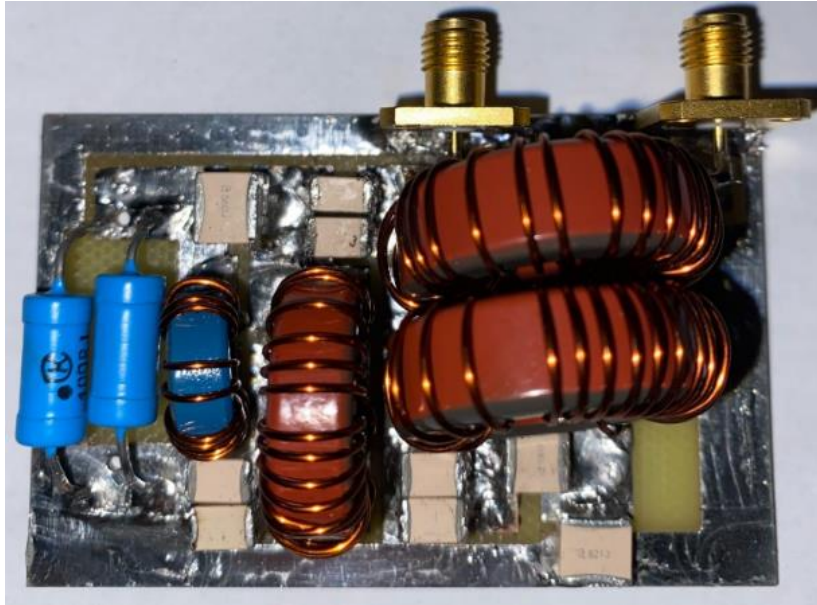


Рис. 4. Макет устройства

Результаты испытаний, полученные при подключении устройства к векторному анализатору цепей «Обзор-1300/1» с выводом результатов в одноименной программе, представлены в виде измеренных графиков АЧХ и КСВН на рис. 5

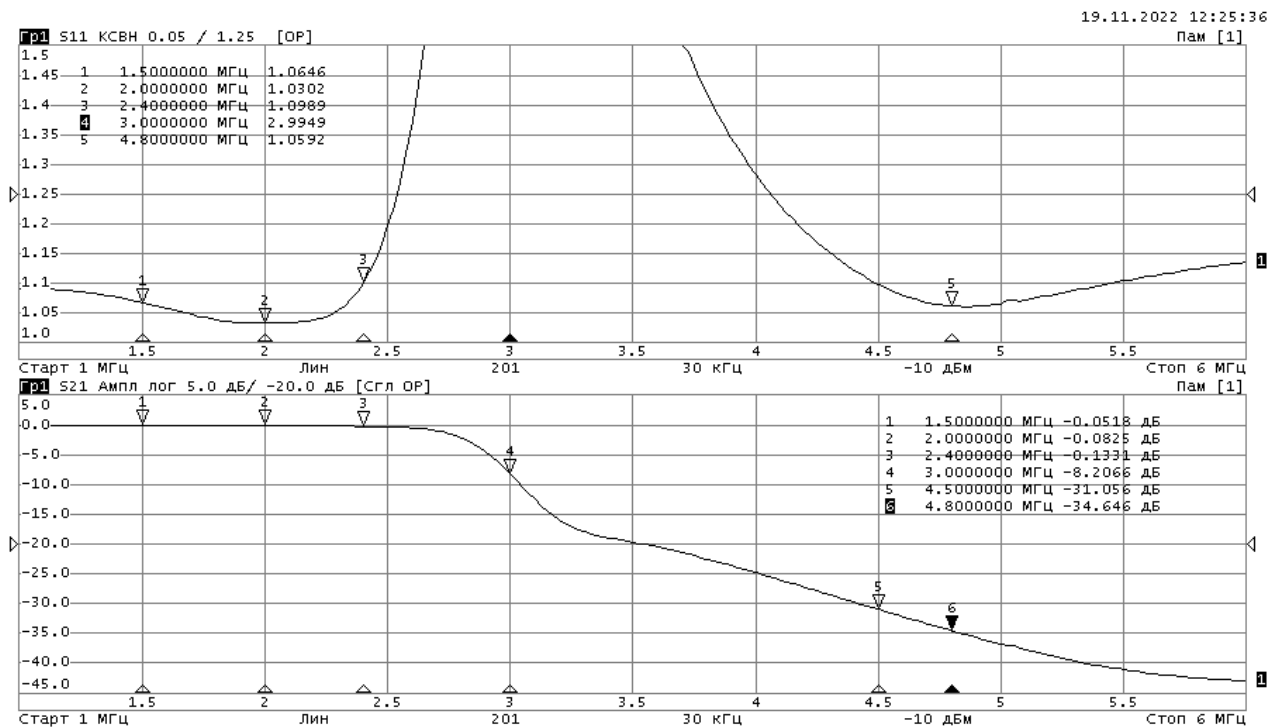


Рис. 5. Графики КСВН и АЧХ с прототипа устройства в программе Обзор-1300/1

Как видно из сравнения рис. 2 и 5, графики в программе AWR и графики с реального устройства совпадают с минимальной погрешностью после калибровки. Для калибровки выбрана катушка L3 (рис. 3). Изменяя расстояния между витками, удалось добиться требуемых результатов по ослаблению каждой гармоники, КСВН не превышает порогового значения 1,15 для ФНЧ и 1,5 для ФВЧ. Это говорит о том, что устройство спроектировано верно.

### III. Заключение

В ходе выполнения поставленной задачи была спроектирована схема 1-го поддиапазона ФГ, которая удовлетворяет поставленным требованиям по ослаблению нежелательных гармоник. Таким образом, взяв за основу схему 1-го поддиапазона и трансформировав реактивные составляющие на другие поддиапазоны ФГ, удастся унифицировать всё устройство в целом.

### Библиографический список

1. Зааль Р. Справочник по расчетам фильтров: пер. с нем. М.: Радио и связь, 1983. 752 с.
2. Дмитриев Е. Е. Основы моделирования в Microwave Office 2009. Интернет-издание, 2011. 177 с. URL: [https://eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev\\_mwo\\_2009\\_1.pdf](https://eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev_mwo_2009_1.pdf) (дата обращения 20.03.23).

*Дата поступления статьи: 23.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Н. И. Кульков, И. В. Хоменко, 2023

УДК 531.717.11

*Д. А. Мазунов, Р. Ю. Гошля, А. Г. Шкаев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

**Аннотация:** В статье описывается разработка устройства для измерения толщины тонких пленок на основе кварцевого микровзвешивания. Приводится описание принципа действия. Данные датчики представляют собой частотные преобразователи, которые позволяют контролировать процесс нанесения пленок непрерывно через контроль изменения частоты пьезорезонатора. Устройство позволяет контролировать толщину тонких пленок с использованием современных технологий.

**Ключевые слова:** пьезодатчики, микроконтроллер, микровзвешивание, пьезорезонаторы, датчики толщины пленок, технология тонких пленок.

### I. Введение

Контроль толщины тонких пленочных покрытий в процессе их напыления является важной задачей. Данная технология используется в производстве оптики и микроэлектроники. Измерение толщины тонких пленок на основе кварцевого микровзвешивания является одним из наиболее точных и удобных методов контроля, поскольку он основан на измерении частоты пьезорезонатора, который является чувствительным к изменению массы покрытия.

Кварцевое микровзвешивание (QCM) – это метод измерения массы и толщины тонких пленок, основанный на использовании пьезоэлектрических свойств кварцевых кристаллов. QCM-датчики толщины пленочных покрытий являются частотными преобразователями, основанными на масс-чувствительных резонаторах, которые могут обнаружить даже

небольшие изменения в массе покрытий. Пьезорезонатор состоит из кварцевого кристалла, на котором находятся электроды. При подаче переменного электрического поля к кристаллу, он деформируется и генерирует механические колебания на определенной частоте, которая зависит от геометрии и механических свойств кристалла. При наличии пленки на поверхности кристалла, масса системы увеличивается, что приводит к изменению резонансной частоты пьезорезонатора.

Цель работы – разработать устройство контроля толщины тонких пленок на основе зависимости частоты от толщины. В работе приводятся результаты разработки устройства для измерения толщины тонких пленок на основе кварцевого микровзвешивания. Устройство производит контроль толщины осаждаемой пленки в режиме «реального времени».

## II. Теория

Под масс-чувствительностью понимается зависимость частоты резонанса пьезоэлектрического резонатора от значения присоединяемой к его поверхности массы  $m$  вещества. Зависимость резонансной частоты от массы  $f_p$  является следствием зависимости

$$f_p = \frac{v}{2h}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость упругой волны;  $h$  – резонансный размер.

Если увеличить резонансный размер пьезоэлемента на  $\Delta h$ , то пропорционально уменьшится резонансная частота. При  $\Delta h \ll h$

$$\frac{\Delta f}{f_p} = -\frac{\Delta h}{h} \quad (2)$$

При этом приращение массы составляет:

$$\Delta m = \Delta h p_k S_{\perp}, \quad (3)$$

где  $p_k$  – плотность пьезоматериала;  $S_{\perp}$  – поверхность пьезоэлемента, нормальная к резонансному направлению, в котором происходит «наращивание» слоя  $\Delta h$ .

Используя данные формулы находим, что

$$\frac{\Delta f}{f_p} = -\frac{\Delta m}{M}, \quad (4)$$

где  $M$  – масса пьезоэлемента.

Прежде всего, из (2) вытекает, что относительные приращения толщины могут регистрироваться практически с тем же разрешением, с каким регистрируются относительные изменения частоты, т.е. на уровне

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta f}{f} \approx 10^{-7} \div 10^{-10} \quad (5)$$

Если использовать высокочастотные резонаторы с колебаниями по толщине, то резонансный размер имеет порядок  $h \approx 0,1$  мм ( $f_p = 15$  МГц), откуда минимально регистрируемые приращения толщины составляют

$$\Delta h_{min} = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{min} h \approx 10^{-8} \div 10^{-11} \text{ мм} \quad (6)$$

Высокая масс-чувствительность, присущая пьезорезонаторам, была обнаружена давно и традиционно использовалась для подстройки резонаторов на номинальную частоту [1].

Пьезодатчики используются для измерения толщины различных типов пленок в процессе их нанесения, так как они позволяют контролировать этот процесс непрерывно и без разрывов, что важно для обеспечения качества покрытий.



Для эффективной работы с датчиками необходимо учитывать не только их конструкцию и принцип работы, но и способы обработки и передачи полученных данных. В процессе измерения толщины пленок, микроконтроллер обрабатывает информацию, полученную от датчиков. После этого данные могут быть переданы на персональный компьютер (ПК) для дальнейшего их анализа и использования.

### III. Описание устройства

Структурная схема представлена на рис.1.

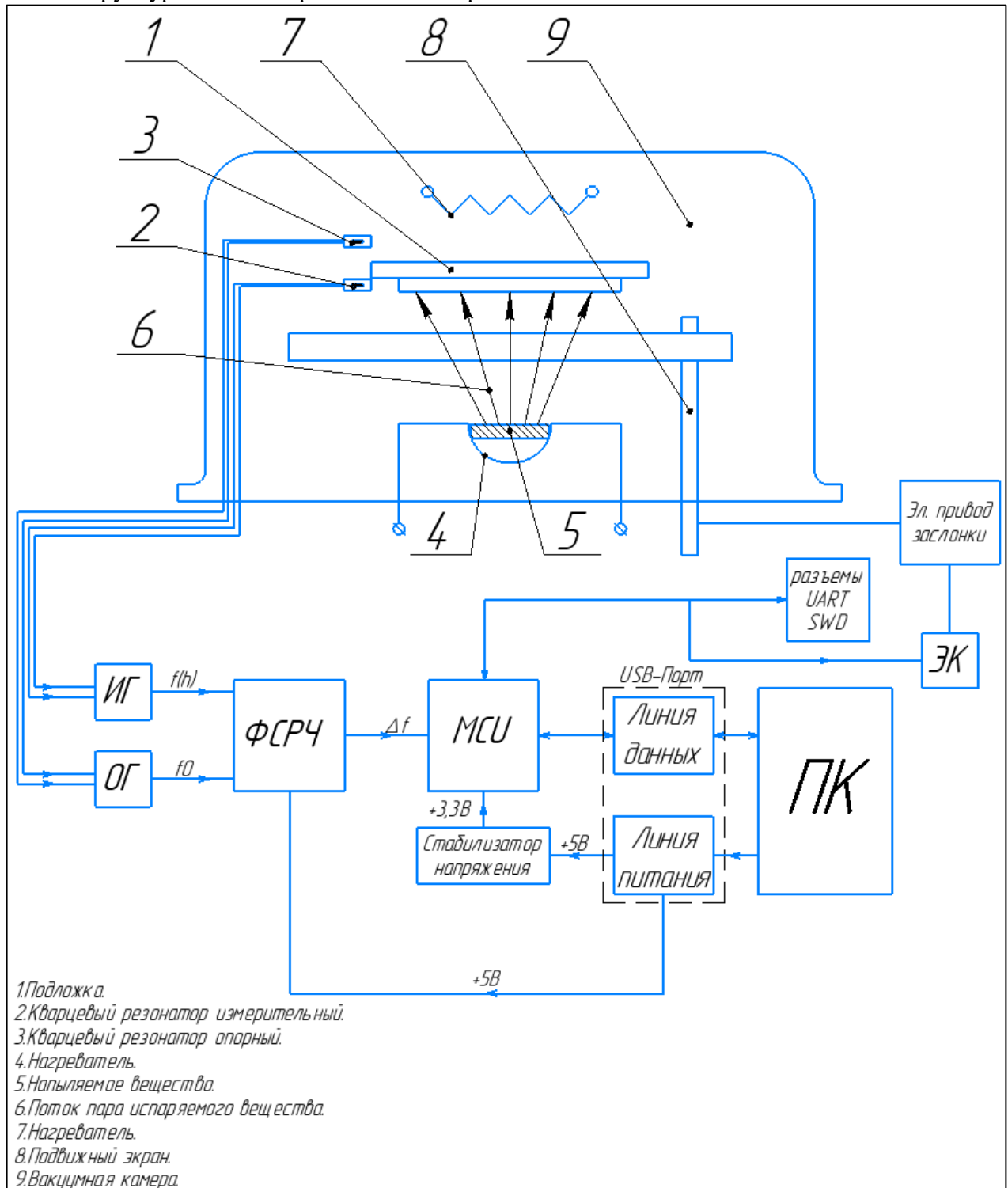


Рис. 1. Структурная схема подключения устройства

На рис. 1 представлены: 1 – подложка, 2 – измерительный пьезодатчик, 3 – опорный пьезодатчик, 4, 7 – нагреватель, 5 – напыляемое вещество, 6 – поток пара испаряемого вещества, 8 – подвижный экран, 9 – вакуумная камера, ИГ – возбуждающий генератор измерительного пьезодатчика, ОГ – возбуждающий генератор опорного пьезодатчика, ФСРЧ – формирователь сигнала разностной частоты, MCU – микроконтроллер, ПК – персональный компьютер, ЭК – электронный ключ, Эл. привод заслонки – электрический привод заслонки.

Процесс сбора информации происходит следующим образом. Оба датчика помещают в вакуумную камеру, в которой происходит напыление на изделие, для более точной обработки информации пьезодатчик измерительный устанавливают в непосредственной близости к изделию, на которое наносится вещество. Опорный пьезодатчик помещен также в вакуумную камеру для обеспечения совпадения температуры с данными измерительного пьезодатчика [2].

Алгоритм работы программы представлен на рис. 2.

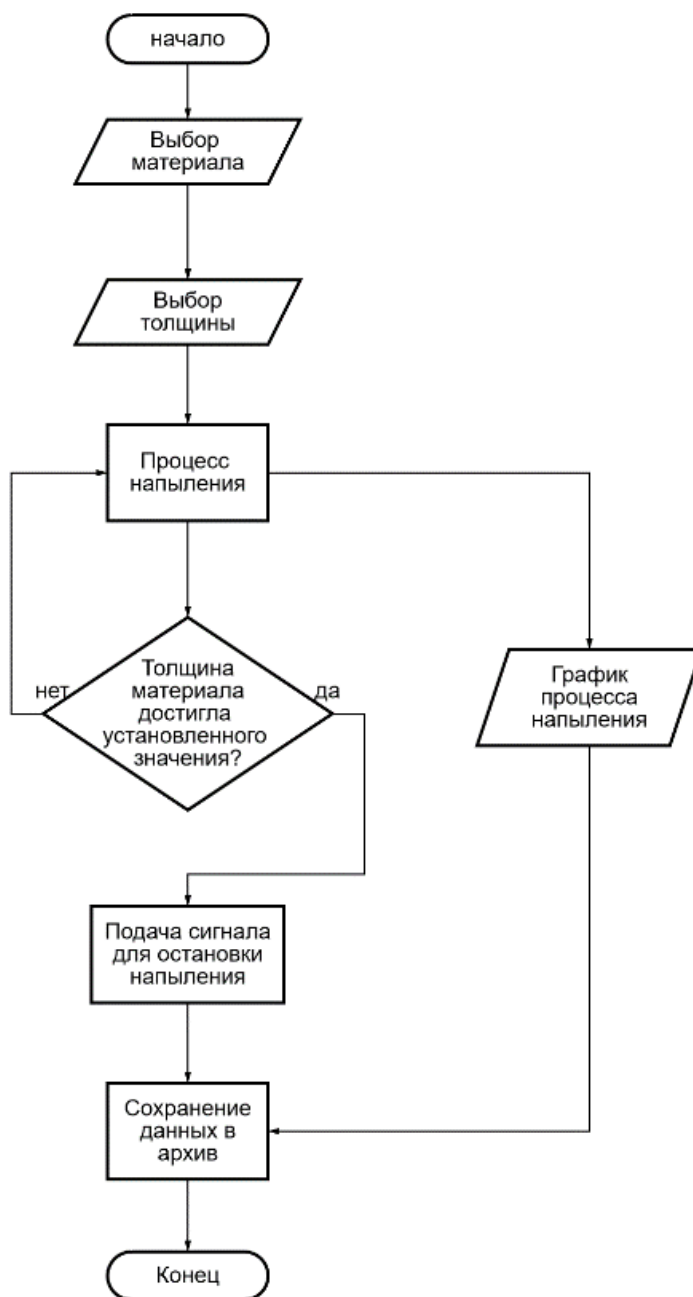


Рис. 2. Алгоритм программы

Корпус измерительного пьезодатчика будет иметь отверстие, через которое осаждаемое вещество будет осаждаться на электроды пьезодатчика. «Диаметр отверстия соответствует диаметру электродов на измерительном пьезодатчике, что снижает погрешность измерений за счет уменьшения влияния пространственной неоднородности потока испаряемого вещества» [2].

Схема электрическая принципиальная представлена на рис. 3 и отображает только функциональную часть устройства измерения толщины тонких пленок, которая отвечает за получение информации о толщине покрытия и передачу этой информации на микроконтроллер, а не всего устройства в целом.

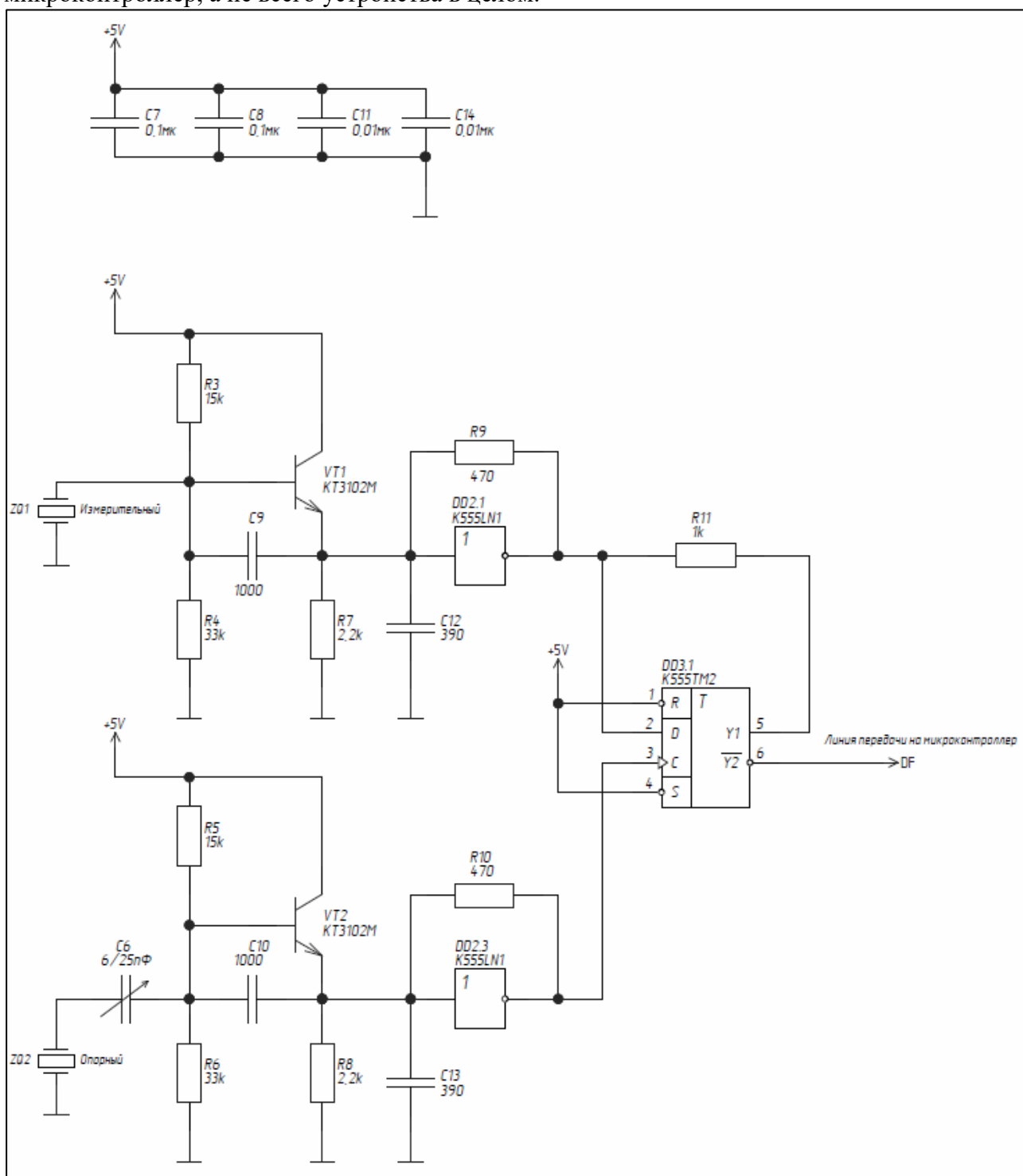


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная сбор и передача данных с пьезодатчиков

Для проводов, которые будут использоваться для соединения датчиков с разъемами на печатной плате, главным требованием является их рабочая температура. В случае вакуумной камеры для напыления, рабочая температура не превышает 150 °С. В соответствии с этими требованиями, можно использовать провода МГТФ, которые имеют рабочий диапазон температур от -60...220 °С.

Трехмерная модель устройства представлена на рис. 4.

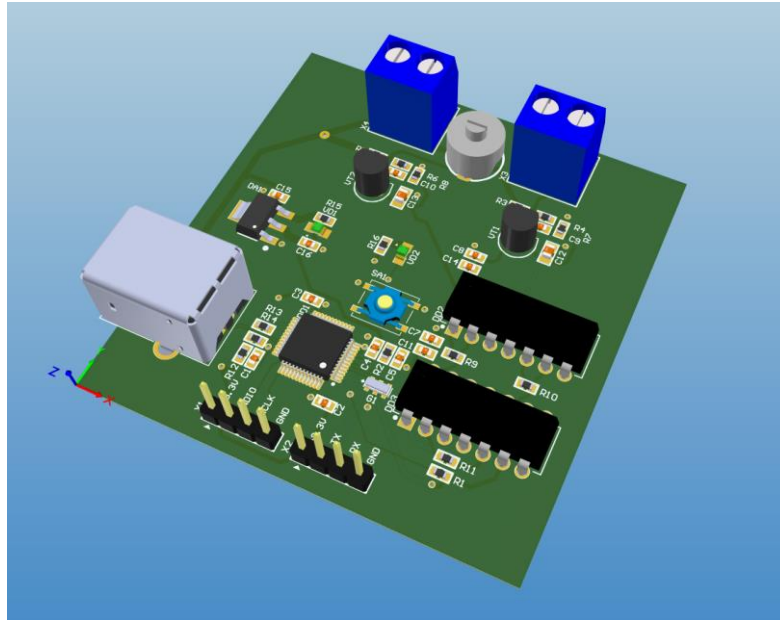


Рис. 4. Трехмерная модель в САПР Altium Designer

График зависимости толщины пленки от массы напыляемого материала представлен на рис. 5.

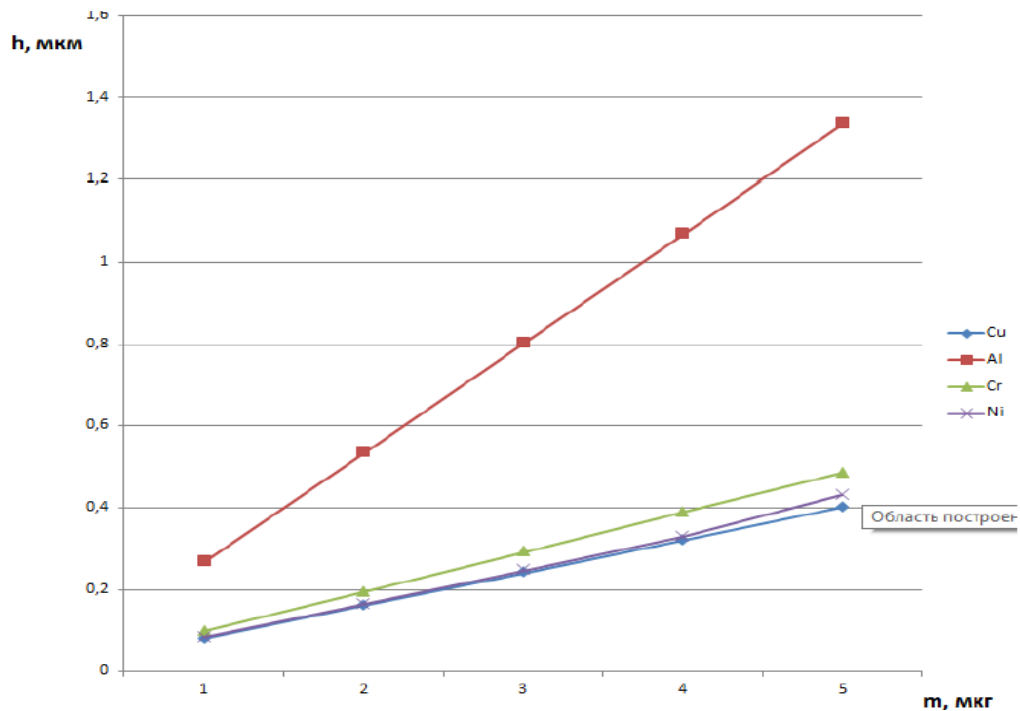


Рис. 5. График зависимости толщины пленки от массы напыляемого материала

#### IV. Заключение

Данное устройство является специализированным в измерении толщины тонких пленок, используемым в производстве интегральных микросхем, оптических покрытий. Пьезодатчики в качестве датчиков для измерения толщины тонких пленок имеют ряд преимуществ, таких как стабильность и точность измерения. В вакуумной камере напыления, погрешность измерений может быть уменьшена благодаря отсутствию воздуха, который может оказывать влияние на измерения.

#### Библиографический список

1. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
2. Альтшуллер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г. Кварцевые генераторы. М.: Радио и связь, 1988. 368 с.

*Дата поступления статьи: 28.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. А. Мазунов, Р. Ю. Гошля, А. Г. Шкаев, 2023

УДК 004.67

*И. К. Манохин*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

#### РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА СЕЛЕКЦИИ ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ ПЛИС: МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Аннотация.** В статье описаны некоторые сведения из процессов разработки и моделирования устройства селекции импульсов на базе программируемых логических интегральных схем. Данное устройство может быть использовано в современных системах радиолокации и радиопеленгации. Обозначены теоретическая зависимость времени селекции импульсов от конфигурации устройства и ее экспериментальное подтверждение.

**Ключевые слова:** селекция импульсов, импульсные измерения, системы радиолокации и радиопеленгации.

#### I. Введение

Устройства селекции импульсов предназначены для систем радиолокации и радиопеленгации для выделения из множества импульсов, присутствующих в эфире, тех, которые обладают заданными параметрами.

Данная работа является идейным продолжением предыдущей публикации автора «Разработка устройства селекции импульсов на базе ПЛИС: теория». В предыдущей работе обозначено, что аналоговые устройства селекции импульсов обладают недостатками, среди которых:

1. Цепь селекции выделяет импульсы только по одному параметру;
2. Устаревшая элементная база, рассредоточенные функции, малая интеграция;
3. Нет возможности корректировки параметров селекции без изменения схемы;
4. Отсутствие возможности гибкой настройки параметров селекции.

В публикации автора «Разработка устройства селекции импульсов на базе ПЛИС: теория» обозначено, что цифровые устройства селекции импульсов лишены этих недостатков. В данной работе будет описан процесс разработки цифрового устройства селекции импульсов на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) на языке описания VHDL и его моделирования в среде ModelSim.

Цель работы – моделирование и оценка полученных характеристик (результатов). Тестовые последовательности для моделирования будут состоять из разных конфигураций устройства селекции импульсов и с разными частотами тактирования.

## II. Теория

На рис. 1 изображен тракт цифровой обработки с устройством селекции импульсов на базе ПЛИС. Описание структуры ПЛИС выполнено на языке VHDL [1].

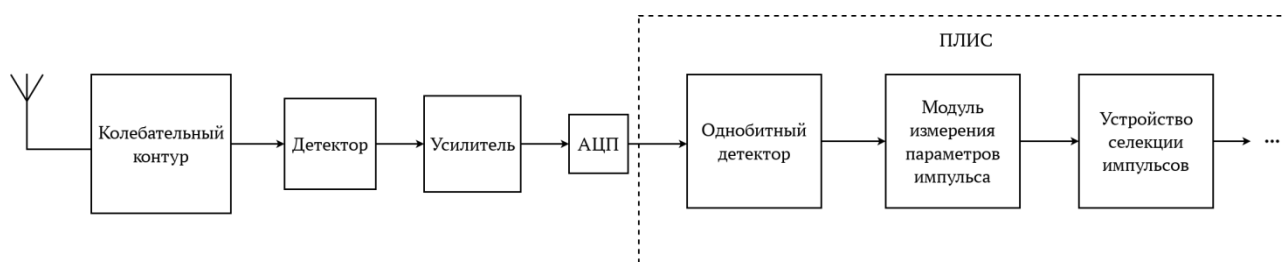


Рис. 1. Тракт цифровой обработки с устройством селекции импульсов на базе ПЛИС.  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Улучшить характеристики тракта цифровой обработки на рис. 1 по скорости, точности измерений, по минимальным возможным длительностям и амплитудам импульсов, а также по помехозащищенности можно за счет повышения частоты дискретизации АЦП, повышения разрядности АЦП, повышения частоты тактирования ПЛИС и увеличения степени параллельности обработки данных. Повышение частоты положительно повлияет на скорость работы устройства селекции импульсов (уменьшится время такта), на минимальную длительность импульса, которую может обработать однобитный детектор, и на точность определения амплитуды (больше выборок для анализа амплитуды для усреднения). Повышение разрядности АЦП также увеличит точность измерения амплитуды. Увеличение параллельности обработки данных увеличит скорость работы устройства селекции импульсов, но увеличит объем ресурсов, которые оно занимает. Уменьшение параллельности – наоборот уменьшит скорость работы устройства селекции импульсов и уменьшит объем ресурсов, которые оно занимает. Увеличение числа компараторов увеличит объем занимаемых ресурсов ПЛИС, увеличит гибкость настройки устройства селекции импульсов и уменьшит скорость его работы при неизменной параллельности.

## III. Результаты экспериментов

На рис. 2 изображена структурная схема устройства селекции импульсов.

Устройство селекции импульсов состоит из компараторов, модулей памяти и управляющей логики. Количество компараторов, количество параметров селекции, число обслуживаемых одновременно компараторов – это настраиваемые величины. Устройство селекции импульсов оснащено возможностью выключения селекции для импульсов, время прихода которых лежит в пределах определенной длительности, которая, в свою очередь, лежит в пределах определенного периода. Эта возможность необходима для того, чтобы снизить поток импульсов, наличие в эфире которых известно, и освободить место в приемнике. Соответствующие длительность и период выключения селекции записываются в модули памяти наряду с другими параметрами селекции. Компаратор состоит из двух типов

субкомпараторов – первый сравнивает входной параметр с нижней и верхней границей параметра, считываемого из модуля памяти, второй предназначен для периодического выключения селекции. Количество субкомпараторов первого типа настраивается. Субкомпаратор второго типа доступен в единственном экземпляре.

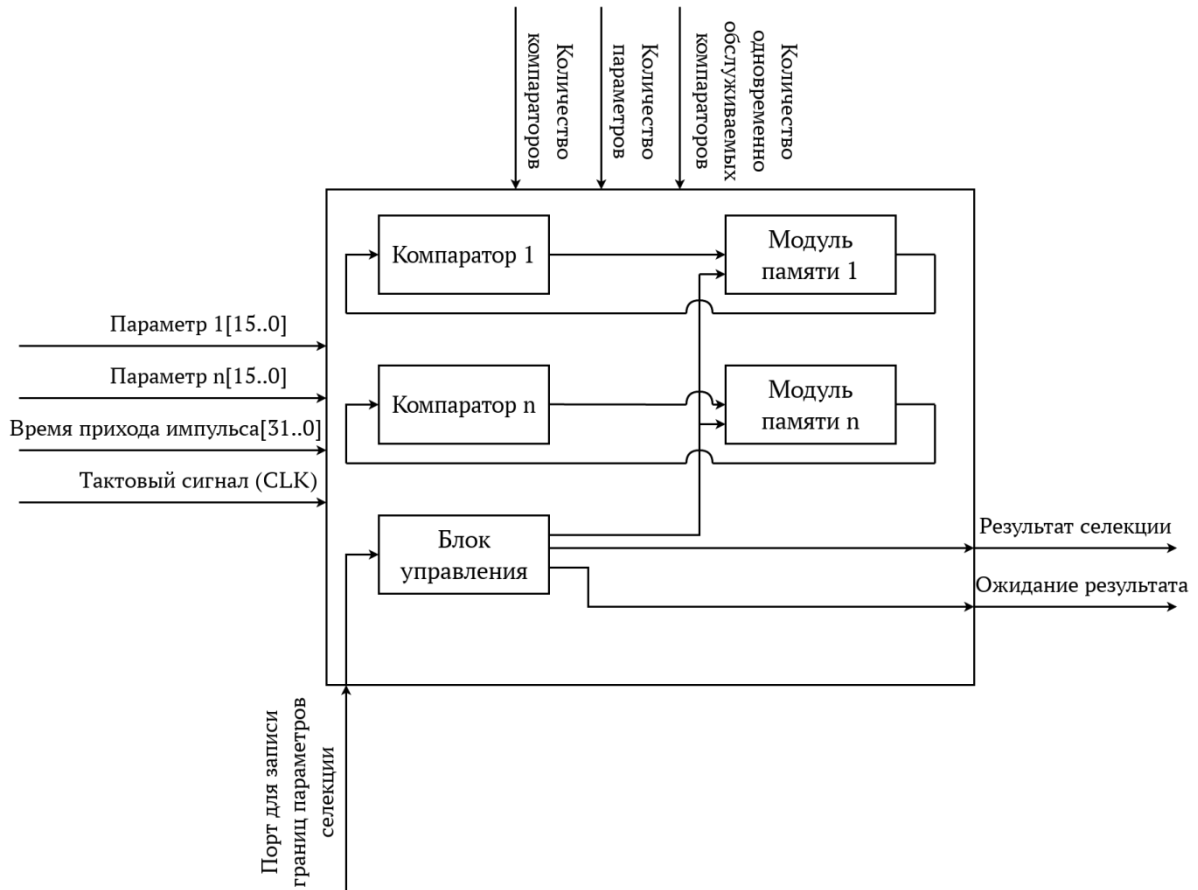


Рис. 2. Структурная схема устройства селекции

Наряду с тем, как один компаратор может последовательно опрашивать все модули памяти, так и каждому модулю памяти может быть поставлен в соответствие свой компаратор, тогда работа модуля селекции импульсов будет параллельной, займет в разы меньше времени, но при этом увеличатся занимаемые ресурсы ПЛИС.

Экспериментально получена следующая зависимость времени селекции устройства селекции импульсов от его конфигурационных характеристик:

$$t_c = \frac{n_c}{f_{CLK} n_s} \cdot \left( K + \frac{n_p - 1}{f_{CLK}} \right), \quad (1)$$

где  $K$  – экспериментально полученное время селекции с одним компаратором и одним параметром селекции (включая компаратор для периодического выключения селекции) с тактовой частотой 1 МГц,  $n_c$  – количество компараторов (для проверки попадания параметра между границами, записанными в модуле памяти),  $n_p$  – количество параметров селекции (не считая времени прихода импульса),  $n_s$  – количество одновременно работающих компараторов,  $f_{CLK}$  – тактовая частота.

В таблице 1 содержатся сведения о временных характеристиках различных конфигураций устройства селекции импульсов. На рис. 3 и 4 изображены некоторые временные зависимости устройства селекции импульсов, полученные в среде ModelSim [2].



**Сравнение характеристик различных конфигураций модуля селекции**

№ конфигурации	$n_c$	$n_p$	$n_s$	$f_{CLK}$	$t_C$ расчетное	$t_C$ при моделировании
1	1	1	1	1 МГц	4000 нс	4000 нс
2	2	1	1	1 МГц	8000 нс	8000 нс
3	1	2	1	1 МГц	5000 нс	5000 нс
4	2	1	2	1 МГц	4000 нс	4000 нс
5	1	1	1	100 МГц	40 нс	40 нс

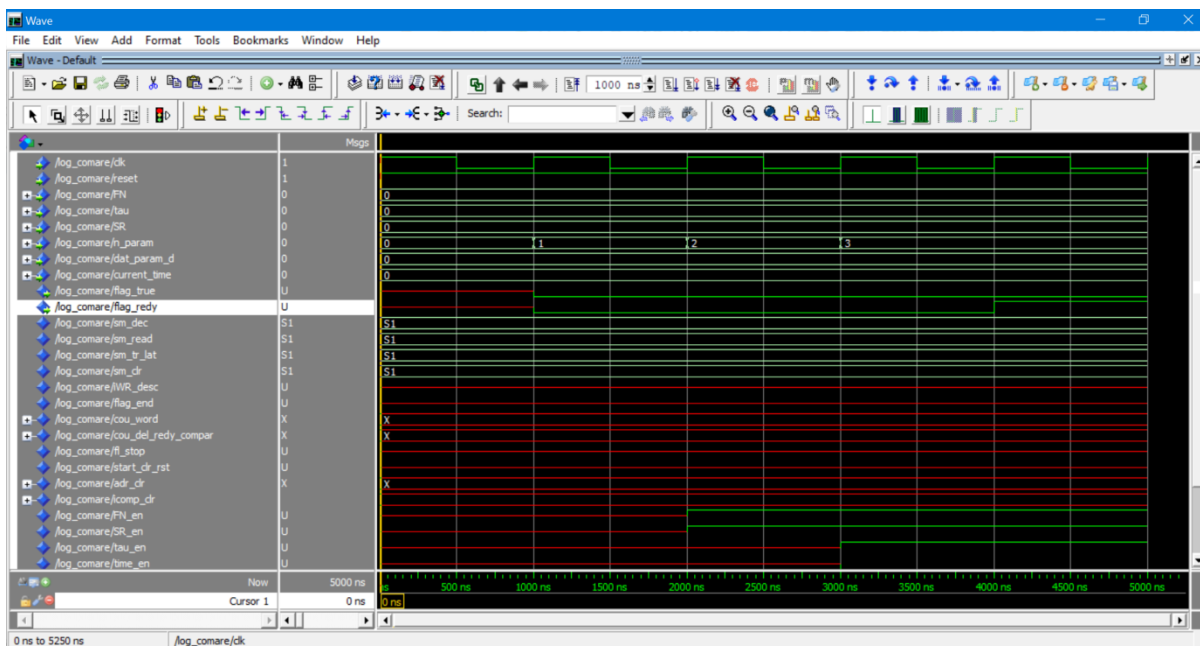


Рис. 3. Моделирование конфигурации №1 таблицы 1 в среде ModelSim (время селекции – 4 мкс)

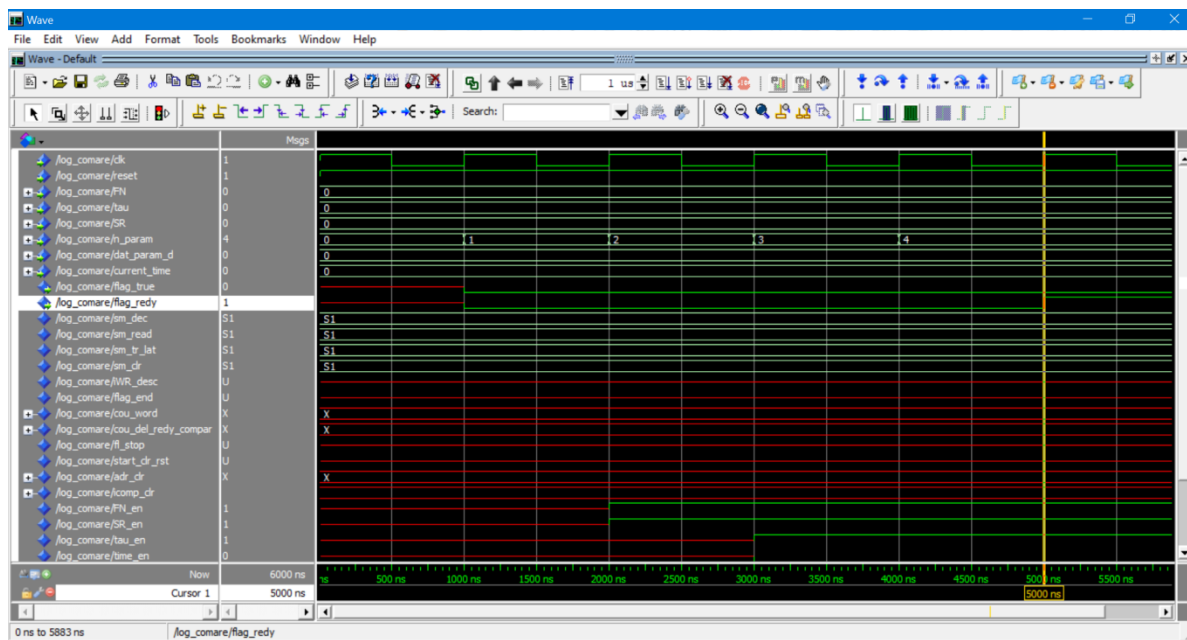


Рис. 4. Моделирование конфигурации №3 таблицы 1 в среде ModelSim (время селекции – 5 мкс)

#### IV. Обсуждение результатов

Результаты моделирования в среде ModelSim совпадают с экспериментально выведенной зависимостью времени селекции устройства селекции импульсов. Повышение числа компараторов и повышение числа параметров увеличивают время селекции и объем занимаемых ресурсов ПЛИС. Увеличение числа одновременно работающих компараторов уменьшает время селекции, но увеличивает объем занимаемых ресурсов. Повышение частоты тактирования устройства селекции импульсов уменьшает время селекции.

#### V. Выводы и заключение

В данной работе было разработано устройство селекции импульсов на языке VHDL для ПЛИС. Устройство было промоделировано в среде ModelSim с различными конфигурациями. Выведена зависимость времени селекции от выбранной конфигурации, совпадающая с результатами моделирования. В последующих публикациях планируется описать разработку однобитного цифрового детектора и реализацию его помехозащищенности, а также синтез устройства селекции импульсов непосредственно на ПЛИС.

#### Библиографический список

1. Ларионцева Е. А. Основы языка описания аппаратуры VHDL // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 12. С. 58. EDN: O0ZHMN.
2. Зотов В. ModelSim – система HDL-моделирования цифровых устройств // Компоненты и технологии. 2002. Вып. 6. С. 122–126.

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© И. К. Манохин, 2023

УДК 621.396

*М. Т. Нгуен, А. Алхадж Хасан*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ АНТЕНН

**Аннотация.** Выполнен сравнительный анализ эффективности применения разных аппроксимаций, используемых при моделировании и изготовлении разреженных антенн. Основная идея аппроксимаций состоит в создании оптимальной проводной структуры, максимально повторяющей пути тока в антенне, сохраняя при этом ее целостность при минимальной массе. Кроме того, её можно использовать в последующих моделированиях с меньшими ресурсами и контролируемой точностью характеристик. В качестве примера использовалась рефлекторная антенна. Обсуждены преимущества и недостатки рассмотренных аппроксимаций. Кратко изложены рекомендации по их применению.

**Ключевые слова:** метод моментов, проводная сетка, разреженные антенны, аппроксимация оптимальной токовой сеткой, параболическая рефлекторная антенна.

## **I. Введение**

Совершенствование технологий изготовления антенных элементов (АЭ) является значимой областью исследований [1]. Это связано не только с тем, что антенны являются важным компонентом любого радиоэлектронного устройства, но и с тем, что достижения в вычислительных методах позволили исследователям предлагать более новаторские решения, используемые в моделировании АЭ. Эти решения помогли получить желаемый конечный продукт, который требует рынок [2]. АЭ должен иметь небольшие размеры и быть легким, с минимальными затратами как на моделирование, так и на изготовление, при сохранении необходимых характеристик [3]. Этого можно достичь на ранних стадиях процесса проектирования АЭ, используя преимущества численных методов в минимизации затрат на моделирование и оптимизацию структур и характеристик АЭ. Кроме того, эти методы составляют основу новых подходов к моделированию АЭ, в результате чего создаются инновационные конструкции антенн с улучшенными характеристиками.

Однако выбор того или иного метода нетривиален и может существенно повлиять на стоимость проектирования. Поэтому часто используется метод моментов (МоМ) [4] из-за простоты как самого метода, а также из-за возможности получения новых подходов на его основе [5]. Более того, он имеет незначительные затраты на дискретизацию и может дать приемлемые результаты, используя меньше ресурсов, чем другие методы [6]. Подход к моделированию с использованием проволочной сетки (ПС) является одним из популярных подходов на основе МоМ, используемых для снижения вычислительных затрат путем аппроксимации поверхности АЭ сеткой из соединенных радиальных и концентрических проводов, по которым протекают поверхностные токи [7].

На основе ПС предложен новый подход к моделированию и изготовлению разреженных АЭ. Он называется «аппроксимацией оптимальной токовой сеткой» (АОТС) [8]. Его идея состоит в исключении из ПС тех проводов, модуль тока в которых меньше заданного уровня относительно максимального. Данный уровень называется допуском удаления элемента сетки (ДУЭС). Одним из недостатков применения АОТС к непечатным структурам АЭ является трудность изготовления полученных структур из-за наличия свободных (несоединенных между собой) проводов. Поэтому предложена «устраняющая» АОТС (УАОТС), в ходе которой проверяются соединения между всеми оставшимися проводами. После чего устраняются провода, которые не соединены с другими, но это повлияет на характеристики антенны. Для устранения этого недостатка при сохранении целостности структуры предложена «соединяющая» АОТС (САОТС). Она гарантирует, что удаление любого провода не приводит к обрыву связи между проводами за счёт сохранения физических соединений проводов сетки, не разрывая основные пути тока в антенне. Однако после неё восстанавливаются много проводов. Поэтому предложена «соединяющая ближние» АОТС (СБАОТС), которая восстанавливает только те провода, которые необходимы для установления связи между свободным проводом и ближайшими к нему проводами в структуре.

Поскольку эти аппроксимации отличаются по их влиянию на полученные структуры, их характеристики, и общие затраты на их проектирование, целесообразен сравнительный анализ для оценки эффективности их использования. Поэтому цель данной работы – провести такой анализ на примере рефлекторной антенны.

## **II. Результаты моделирования и их анализ**

При удалении значительного количества проводов с ростом ДУЭС, после использования этих аппроксимаций при построении разреженных структур АЭ, характеристики антенны изменятся. Пользователь или производитель в соответствии с его требованиями принимает решение о приемлемости изменений. Кроме того, на это может влиять область применения АЭ. Например, для спутниковых приложений решающим

фактором является масса АЭ. Кроме того, размер АЭ и общая стоимость являются наиболее важными факторами для производителей носимых АЭ, а уменьшение необходимых ресурсов для моделирования АЭ является ценным преимуществом для любых научных исследований в этой области. Поэтому далее сравниваются характерные улучшения, которые можно получить после применения рассмотренных аппроксимаций.

Для этого они применялись на примере моделирования параболического АЭ JRC-24DD MIMO из [9] (рис. 1а). Его геометрические параметры: диаметр  $D = 400$  мм, глубина  $h = 143,6$  мм, фокусное расстояние  $F = 75$  мм. В качестве источника возбуждения (рис. 1б) использован диполь длиной  $l = \lambda/3,6$ , размещенным в фокусе отражателя. Радиус диполя выбран равным  $R_1 = \lambda/3,6$ , а радиус провода сетки  $R_2 = \lambda/30$ . ПС состояла из 60 радиальных и 25 концентрических проводов (рис. 1в). Приоритетным фактором, который можно оценивать при сравнении результатов использования этих аппроксимаций, является количество проводов, остающихся и исключаемых после каждой из них с ростом ДУЭС.

Рис. 2 показывает эти зависимости на частоте 5,1 ГГц. Общее количество проводов разреженной структуры, в свою очередь, влияет на характеристики АЭ, но существенное влияние будет оказано на массу и требуемые ресурсы для ее моделирования. Максимальные коэффициенты усиления ( $KU_{\text{макс}}$ ) полученных структур после этих аппроксимаций, при изменении ДУЭС от 0% до 50%, представлены на рис. 3а. При этом зависимости уменьшения массы АЭ и вычислительных затрат при его последующем моделировании показаны на рис. 3б и рис. 4, соответственно.

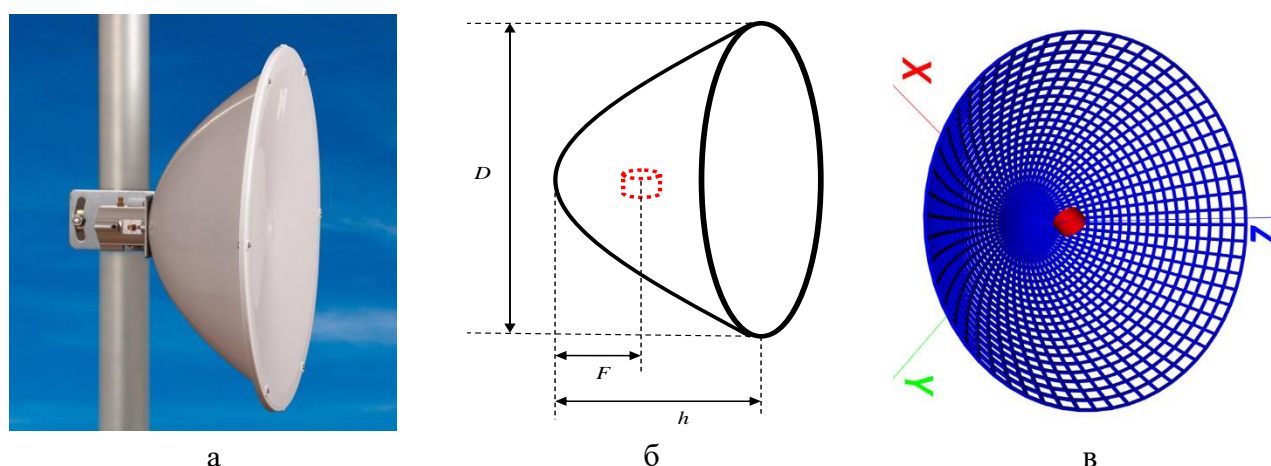


Рис. 1. Исследуемая рефлекторная антенна (а), её изометрический вид (б) и эквивалентная ПС (в)

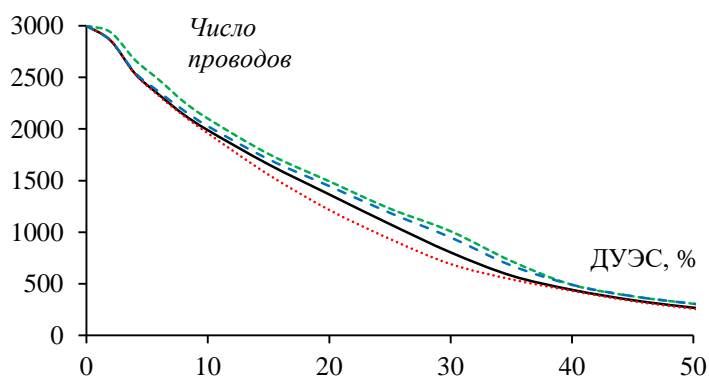


Рис. 2. Количество оставшихся проводов разреженной антенны при изменении ДУЭС после АОТС (—), САОТС (---), УАОТС (····) и СБАОТС (- -)

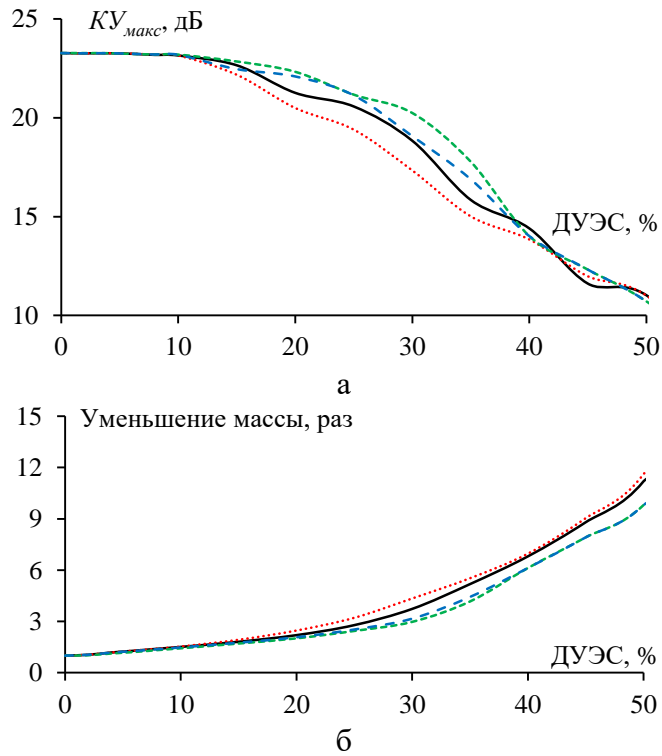


Рис. 3. Зависимости  $KU_{\text{макс}}$  (а) и уменьшения массы (б) разреженной антенны от ДУЭС после АОТС (—), САОТС (---), УАОТС (····) и СБАОТС (- -)

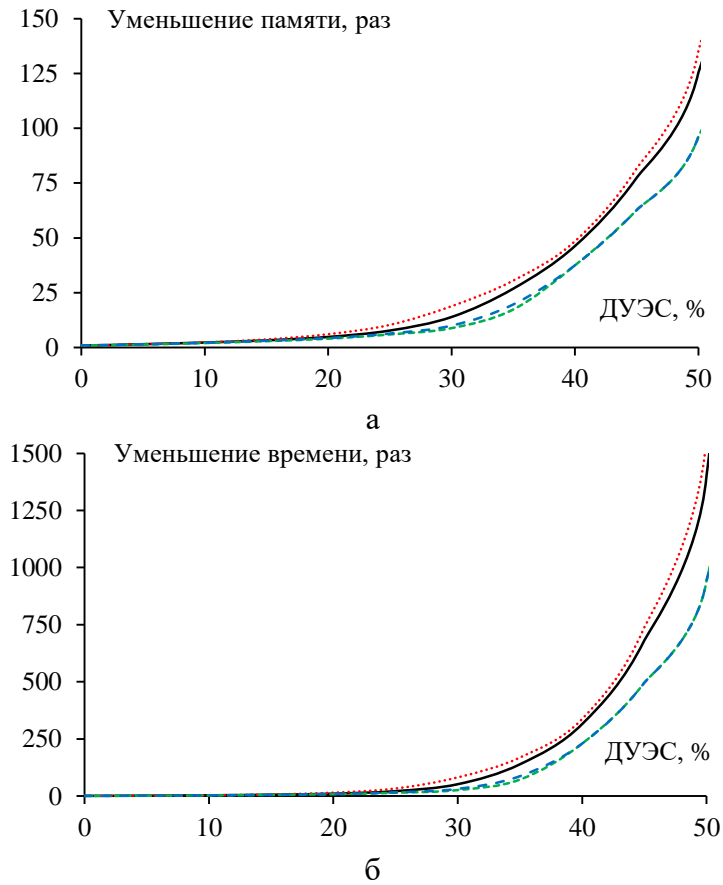


Рис. 4. Зависимости уменьшения памяти (а) и времени (б) при последующем моделировании в от ДУЭС после АОТС (—), САОТС (---), УАОТС (····) и СБАОТС (- -)

Как следует из данных на рис. 3а, применение исследуемых аппроксимаций генерирует разреженные структуры, которые практически не отличаются по характеристикам друг от друга вплоть до ДУЭС = 10 %. После этого, расхождения становятся более заметными. По сравнению с КУ<sub>макс</sub> для исходной ПС структуры, его значения после САОТС являются наиболее близкими для ДУЭС > 10 %, тогда как наиболее неточными являются результаты, полученные после УАОТС. Это можно пояснить количеством оставшихся и исключенных проводов после них. С увеличением значения ДУЭС, САОТС сохраняет большее количество проводов по сравнению с другими, в то время как УАОТС по своей природе исключает наибольшее количество проводов (рис. 2). Это, в свою очередь, отражается на уменьшении массы, полученной после них, как видно на рис. 3б. Стоит отметить, что САОТС и СБАОТС достаточно близки по своим результатам, что хорошо заметно на рис. 4. Однако последний превосходит первый по преимуществам, которые можно получить после их использования при одинаковом значении ДУЭС. Несмотря на то, что все эти аппроксимации различаются по преимуществам и недостаткам их применения, они приводят к структурам, которые могут быть использованы либо как эквивалентная модель для моделирования исходной антенны, либо как разреженные антенны, изготавливаемые вместо нее. Это дополнительно подтверждается данными следующей таблицы, где КУ<sub>макс</sub>, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и ширина луча (ШЛ) диаграмма направленности на уровне – 3 дБ рассчитаны для полученных разреженных структур после применения всех аппроксимаций и сравнены с измеренными из [9].

Таблица 1

**Измеренные и рассчитанные характеристики антенны до и после аппроксимаций**

Модель АЭ	Частота, ГГц	КУ <sub>макс</sub> , дБ	КСВН	ШЛ (E/H), °
Измерение	5,1	24,5±1	≤1,5	≈9/9
	5,9			
Используя ПС	5,1	23,27	1,22	12/8
	5,9	24,49	1,25	12/8
После АОТС	5,1	23,15	1,22	12/8
	5,9	24,22	1,26	12/8
После САОТС	5,1	23,20	1,22	12/8
	5,9	24,39	1,25	12/8
После УАОТС	5,1	23,15	1,22	12/8
	5,9	24,19	1,25	12/8
После СБАОТС	5,1	23,19	1,23	12/8
	5,9	24,42	1,24	12/8

В качестве краткого итога сравнения можно заключить, что УАОТС превосходит САОТС по уменьшению массы и ресурсов, когда коэффициент ДУЭС превышает 10 %. Однако он дает наихудшую точность результатов АЭ. СБАОТС исключает больше проводов по сравнению с САОТС, но все равно обеспечивает целостность структуры рефлектора АЭ. Исходя из этого, рекомендуется использовать УАОТС, когда необходимо снизить вычислительные затраты на моделирование, особенно при исследовании характеристик АЭ, где требуются быстрые оценки. Когда требуется высокая точность результатов, целесообразнее всего использовать САОТС. Оптимальным выбором, с учетом всех этих факторов, является СБАОТС, поскольку она может обеспечить значительное уменьшение массы и затрат на моделирование при приемлемой точности результатов по сравнению с другими аппроксимациями.

### III. Заключение

В данной работе выполнен сравнительный анализ эффективности использования рассмотренных аппроксимаций, используемых при моделировании и проектировании разреженных антенн на примере параболической рефлекторной антенны. Результаты, полученные при их применении, сравнивались между собой и с измеренными. Обсуждены их преимущества и недостатки, и приведены рекомендации по их применению. Выявлено, что СБАОТС кажется оптимальным выбором, который может обладать преимуществами других аппроксимаций и генерировать разреженные структуры, способные удовлетворить любые требования. Будущая работа направлена на оценку эффективности их применения на разных типах антенн.

Научный руководитель: Тальгат Рашитович Газизов, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2023-0014.

### Библиографический список

1. Kumar O. P., Kumar P., Ali T., Kumar P., Vincent S. Ultrawideband Antennas: Growth and Evolution // *Micromachines*. MDPI AG, 2021. Vol. 13, № 1. P. 60. DOI:10.3390/mi13010060.
2. Munina I., Grigoriev I., O'donnell G., Trimble D. A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 8790–8809. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3239782.
3. Liang M., Shemelya C., MacDonald E., Wicker R., Xin H. 3-D Printed Microwave Patch Antenna via Fused Deposition Method and Ultrasonic Wire Mesh Embedding Technique // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. Vol. 14. P. 1346–1349. DOI:10.1109/LAWP.2015.2405054.
4. Harrington R. F. Matrix methods for field problems // *Proceedings of the IEEE*., Feb. 1967. Vol. 55, № 2. P. 136–149. DOI:10.1109/PROC.1967.5433.
5. Rao S. A Simple and Efficient Method of Moments Solution Procedure for Solving Time-Domain Integral Equation–Application to Wire-Grid Model of Perfect Conducting Objects // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. 2019. Vol. 4. P. 57–63. DOI:10.1109/JMMCT.2019.2900702.
6. Makarov S. N. *Antenna and EM Modeling with MATLAB*; New York: John Wiley & Sons, 2002. 288 p.
7. Alhaj Hasan A., Klyukin D. V., Kvasnikov A. A., Komnatnov M. E., Kuksenko S. P. On Wire-Grid Representation for Modeling Symmetrical Antenna Elements // *Symmetry*. MDPI AG, 2022. Vol. 14, № 7. P. 1354. DOI:10.3390/sym14071354.
8. Alhaj Hasan A., Nguyen T. M., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Wire-Grid and Sparse MoM Antennas: Past Evolution, Present Implementation, and Future Possibilities // *Symmetry*. MDPI AG, 2023. Vol. 15, № 2. P. 378. DOI:10.3390/sym15020378.
9. Jirous antennas direction for your waves. URL: [https://en.jirous.com/antenna-5ghz-parabolic/jrc-24DD\\_MIMO](https://en.jirous.com/antenna-5ghz-parabolic/jrc-24DD_MIMO) (дата обращения: 15.02.2023).

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. Т. Нгуен, А. Алхадж Хасан, 2023

*М. А. Рябова<sup>1,2</sup>, А. Б. Ионов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ПАО «Сатурн», г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ПОГРЕШНОСТЬ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Аннотация.** В статье анализируется проблема влияния внешних факторов на результаты бесконтактных измерений температуры, при этом в качестве основного дестабилизирующего фактора рассматривается неустранимый эффект поглощения излучения объекта атмосферными парами воды. Основу исследования составило моделирование процесса измерения температуры в диапазоне 100 – 600 °С с использованием системы MATLAB, а также с подключением базы данных молекулярной спектроскопии HITRAN. Представлены результаты экспериментального моделирования случайной и систематической погрешности бесконтактных измерений температуры, характерной для различных измерительных ситуаций при использовании в составе прибора чувствительных элементов, имеющих различные характеристики.

**Ключевые слова:** температура, пирометрия, достоверность измерений, погрешность, влажность, база данных HITRAN.

### **I. Введение**

В настоящее время бесконтактное измерение температуры (пирометрия) нашло широкое применение в различных областях, начиная от бытовых рабочих процессов и заканчивая различными промышленными отраслями и высокотехнологическими производствами: тепло- и электроэнергетика, контроль высокотемпературных процессов, металлургия и металлообработка, проверка электрического оборудования.

Пирометрия представляет собой совокупность методов измерения температуры нагретых тел по их излучению. Определение температуры происходит с помощью пирометра - современного инженерного устройства, предназначенного для определения температуры любого предмета.

Основным недостатком пирометров является невысокая информативность сигнала, поступающего с чувствительных элементов на вход системы обработки данных прибора. При проведении измерений в сложных условиях интенсивность падающего на приемную площадку пирометра ИК-излучения сильно зависит от внешних факторов (запыленность, влажность, расстояние до прибора). Всё это ведет к искажению оптического излучения, которое несет информацию о температуре объекта.

Таким образом, задача сведения к минимуму методической погрешности пирометрических измерений признана одной из ключевых по причине сложности ее контроля и склонности к быстрому росту [1].

### **II. Постановка задачи**

Методы бесконтактного теплового контроля, основанные на использовании физического эффекта излучения, практически не вносят искажение в температурное поле объекта контроля (ОК). Однако, основным недостатком систем для бесконтактного измерения температуры, влияющим на точность результата измерения, является воздействие внешних факторов. К таким факторам относятся: состояние поверхности ОК (неизвестный коэффициент излучения, шероховатость), степень прозрачности и загрязненности атмосферы (пыль, дым), уровень паразитных фонового и отраженного излучений, температура



окружающей среды, влажность, расстояние от прибора до ОК и т.д. Всё это ведет к искажению оптического излучения, которое несет информацию о температуре объекта. В данной статье более подробно будет рассмотрено влияние влажности атмосферного воздуха на процесс бесконтактного измерения температуры [2-3].

Основная цель работы – провести моделирование случайной и систематической погрешности бесконтактных измерений температуры, характерной для различных измерительных ситуаций (различных уровней влажности) при использовании в составе прибора чувствительных элементов с различными характеристиками.

### III. План эксперимента

В качестве модели используется классическая схема радиометрической цепочки, в которую входят: источник излучения среда распространения и приемник излучения [4]. Для моделирования эффекта поглощения излучения парами воды используется модель, реализованная в системе MATLAB на базе данных HITRAN [5].

При моделировании рассматривалось четыре измерительных ситуации, параметры которых представлены в таблице 1. На рис. 1 в качестве примера показаны регистрируемые пирометром спектры излучения объекта, имеющего температуру 600 °С, с учетом эффекта поглощения парами воды для каждой из четырех ситуаций.

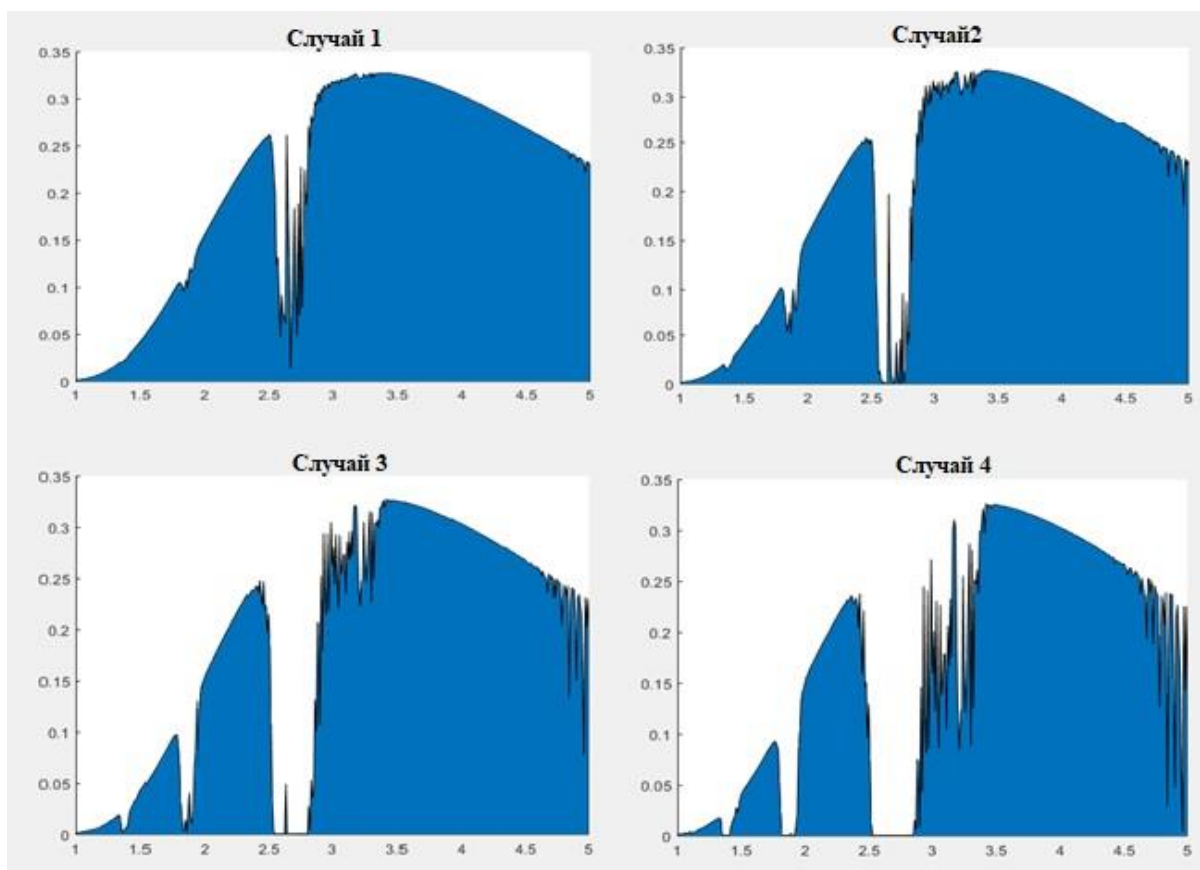


Рис. 1. Спектры излучения для четырех ситуаций

При моделировании рассматривалось применение фотогальванического элемента ФЭ-724 [6] в качестве приемника излучения, перед которым размещается оптический фильтр для выделения требуемого участка спектра. Было проведено исследование одиннадцати вариантов оптических фильтров с характеристиками, представленными в таблице 2. Где  $\lambda_{max}$  – длина волны максимума пропускания фильтра;  $\lambda_{0,5}$  – длина волны, на которой пропускание

фильтра составляет 50 % от максимума;  $\lambda_{0,1}$  - длина волны, на которой пропускание фильтра составляет 10 % от максимума;  $FW_{HM}$  – ширина полосы пропускания фильтра на уровне 50 % от максимума;  $FW_{0,1M}$  - ширина полосы пропускания фильтра на уровне 10 % от максимума.

Таблица 1

**Рассматриваемые измерительные ситуации**

№	Расстояние ОК – ПИРОМЕТР, м	Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, %	Концентрация паров воды, г/м <sup>3</sup>
1	2	20	40	6,92
2	5	25	50	11,5
3	15	30	60	18,24
4	25	40	75	38,4

Таблица 2

**Характеристики используемых фильтров**

№	Тип фильтра	$\lambda_{max}$ , МКМ $\pm 0,02$	$\lambda_{0,5}$ , МКМ	$\lambda_{0,1}$ , МКМ	$FW_{HM}$ , нм $\pm 20$	$FW_{0,1M}$ , нм $\pm 30$
1	полосовой	2,98	2,95...3,03	-	70	120
2	полосовой	3,07	3,01...3,14	-	140	220
3	полосовой	3,23	3,18...3,23	-	100	160
4	полосовой	3,278	3,194...3,327	-	90	150
5	полосовой	3,29	3,18...3,4	-	220	350
6	полосовой	3,32	3,25...3,38	-	200	320
7	полосовой	3,4	3,25...3,54	-	280	450
8	полосовой	3,58	3,51...3,65	-	140	230
9	полосовой	3,9	3,82...3,96	-	140	230
10	полосовой	4,31	4,21...4,41	-	200	320
11	отрезающий	-	-	1,6	-	-

**III. Результаты моделирования**

В таблицах 3 и 4 приведены результаты моделирования систематической погрешности и случайной погрешности измерений для случаев 1 и 4. В первом случае концентрация паров воды составляет 6,92 г/м<sup>3</sup>, расстояние 2 м. В четвертом случае концентрация составляет 38,4 г/м<sup>3</sup>, а расстояние 25 м (см. таблицу 1). Проводилось сравнение максимальных значений случайной и систематической погрешности, наблюдаемых в отдельных диапазонах температур объекта для каждого из 11-ти типов приемников излучения.

Таблица 3

## Результаты моделирования погрешности измерений

№	Погрешность, °С	(100 – 200) °С		(200 – 400) °С		(400 – 600) °С	
		1	4	1	4	1	4
1	Систематическая	0,31	27,55	0,63	54,57	1,06	89,63
	Случайная	114,90	114,00	62,20	103,3	4,29	6,77
2	Систематическая	0,29	26,94	0,56	53,49	0,98	87,93
	Случайная	85,00	85,00	19,59	35,25	2,05	3,15
3	Систематическая	0,32	28,10	0,63	55,31	1,06	90,43
	Случайная	85,81	86,65	23,07	44,21	2,70	4,16
4	Систематическая	0,29	26,02	0,59	51,78	0,99	85,19
	Случайная	87,37	87,01	24,53	41,01	2,99	4,23
5	Систематическая	0,21	17,56	0,43	36,29	0,73	60,99
	Случайная	59,45	60,04	9,17	12,27	1,18	1,54
6	Систематическая	0,18	15,33	0,38	32,00	0,65	54,10
	Случайная	60,59	61,67	9,87	13,06	1,30	1,67
7	Систематическая	0,10	8,25	0,22	18,46	0,39	32,43
	Случайная	47,52	48,30	6,67	7,29	0,94	1,02
8	Систематическая	0,0012	0,14	0,0026	0,28	0,0044	0,48
	Случайная	59,82	59,30	11,20	11,39	1,79	1,82
9	Систематическая	0,0012	0,10	0,0020	0,21	0,0032	0,35
	Случайная	49,10	49,29	9,76	9,52	1,92	1,87
10	Систематическая	0,0027	0,25	0,0047	0,50	0,0076	0,82
	Случайная	66,73	67,44	20,04	20,17	4,47	4,78
11	Систематическая	0,65	7,10	2,62	25,68	6,10	53,38
	Случайная	8,63	9,03	1,46	1,571	0,22	0,25

## IV. Заключение

По результатам моделирования в целом, можно сделать следующие выводы:

– значение систематической погрешности сильно зависит от условий измерений для всех исследуемых фильтров, а значение случайной погрешности слабо зависит от условий измерений;

– для измерений в диапазоне температур 100 – 200 °С из рассмотренных фильтров подходит только широкополосный фильтр № 11, поскольку только у него значение случайной погрешности не превышает 10 °С;

– с точки зрения случайной погрешности в диапазоне 200 – 400 °С для случая 1 подходят датчики № 5, 6, 7, 8, 9, 11, в диапазоне 400 – 600 °С подходят все датчики для обоих случаев;

– с точки зрения постоянной погрешности для измерений в условиях первого случая подходят все датчики, так как погрешность для датчиков № 1-10 не превышает 1 °С, а для датчика № 11 – 6 °С;

– для измерений в условиях четвертого случая в диапазоне 200 – 400 °С и 400 – 600 °С подходят датчики № 8-10, так как погрешность не превышает 1 °С;

– оптимальным датчиком для измерений в диапазоне 100 – 200 °С является датчик № 11. Полная погрешность для первого случая составила 9,3 °С, для четвертого случая 17 °С;

– для измерений в диапазонах 200 – 400 °С и 400 – 600 °С наилучшим образом зарекомендовали себя датчики № 8 и № 9.

– значения полной (суммарной) погрешности для датчиков № 8 и № 9 в первом и четвертом случаях представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Суммарная погрешность датчиков № 8 и № 9**

№ Датчика	Полная погрешность в диапазоне (200 – 400) °С		Полная погрешность в диапазоне (400 - 600) °С	
	1 случай	4 случай	1 случай	4 случай
8	11,203	11,673	1,795	2,295
9	9,759	9,7329	1,918	2,223

**Библиографический список**

1. Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Ионов А. Б. Диагностика измерительной ситуации при бесконтактных измерениях температуры в сложных условиях // Омский научный вестник. 2016. № 6 (150). С. 147-151.

2. Самсонов А. И., Самсонов И. А. Эффективное применение способов пирометрических измерений в производстве строительных материалов // Вестник МГСУ. 2012. № 9. С. 165-170.

3. Minkina W., Klecha D. Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements // J. Sens. Sens. Syst. 2016. Vol. 5. P. 17–23.

4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.

5. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C., Kochanov R. V. [and all] The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. Vol. 203. P. 3–69.

6. Анисимова Н. П., Кулагов В. Б., Луганский Ю. М. Промышленные низкотемпературные пирометры спектрального отношения // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 83–86.

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. А. Рябова, А. Б. Ионов, 2023

П. П. Снетков, А. Е. Максимов, С. П. Куксенко

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

## О ВЛИЯНИИ ЗАКРУГЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ СВЯЗАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА МАТРИЦЫ ЕЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

**Аннотация.** Исследовано влияние закругления торцов проводников связанной микрополосковой линии передачи на изменения ее матриц погонных параметров. Рассмотрено несколько видов закругления. Показано, что при увеличении толщины и уменьшении ширины проводников закругления торцов приводят к большим изменениям в матрицах.

**Ключевые слова:** связанная микрополосковая линия передачи, матрицы погонных параметров, метод моментов, закругление торцов проводников.

### I. Введение

Микрополосковые линии передачи (МПЛ), в качестве различных межсоединений, широко используются при создании современных радиоэлектронных средств. При проектировании МПЛ их активные проводники, как правило, имеют прямоугольную форму. Однако при изготовлении МПЛ их проводники часто имеют закругления углов на торцах, что может оказывать неконтролируемое влияние на погонные параметры и характеристики линий. Так, в работе [1] на примере однопроводной МПЛ показано, что это влияние может быть существенным. Однако авторам данной работы не известны оценки влияния закругления торцов на параметры многопроводных МПЛ. Поэтому целью данной работы является восполнение этого пробела в части двухпроводной МПЛ. В работе использована система TALGAT, основанная на методе моментов [2]. Последовательно изменялось закругление торцов, а также толщина и ширина проводников МПЛ, после чего производился расчет ее матриц погонных параметров: электростатической (**C**) и электромагнитной (**L**) индукции. В работе использована густая равномерная сегментация границ, а для аппроксимации торцов проводников использованы дуги.

### II. Параметры МПЛ

В работе использована МПЛ со следующими параметрами ее поперечного сечения: расстояние между проводниками  $s = 0,6$  мм; расстояние от проводников до границ структуры  $d = 1,5$  мм; толщина диэлектрической подложки  $h = 0,5$  мм; относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 4,4$ ; толщина проводников  $t = 18, 35, 70, 105$  мкм; ширина проводников  $w = 0,2$  и  $0,4$  мм. Рассмотрено два вида закругления торцов проводников (рис. 1): только верхней части, с радиусом, равным толщине проводника (далее частично закругленные торцы); верхней и нижней частей, с радиусом, равным половине толщины проводника (далее полностью закругленные торцы). В первом случае радиус закругления торцов проводников принимался  $R = t, 1,1 t$  и  $1,6 t$ , а во втором –  $r = 0,5R$ .

Численная оценка влияния закругления торцов (при равных толщине и ширине проводников) на изменение матриц **C** и **L** осуществлялась по нормам (нижний индекс – вид закругления):

$$\Delta_c = \frac{\|C_1 - C_2\|}{\|C_1\|}, \quad (1)$$

$$\Delta l = \frac{\|\mathbf{L}_1 - \mathbf{L}_2\|}{\|\mathbf{L}_1\|}. \quad (2)$$

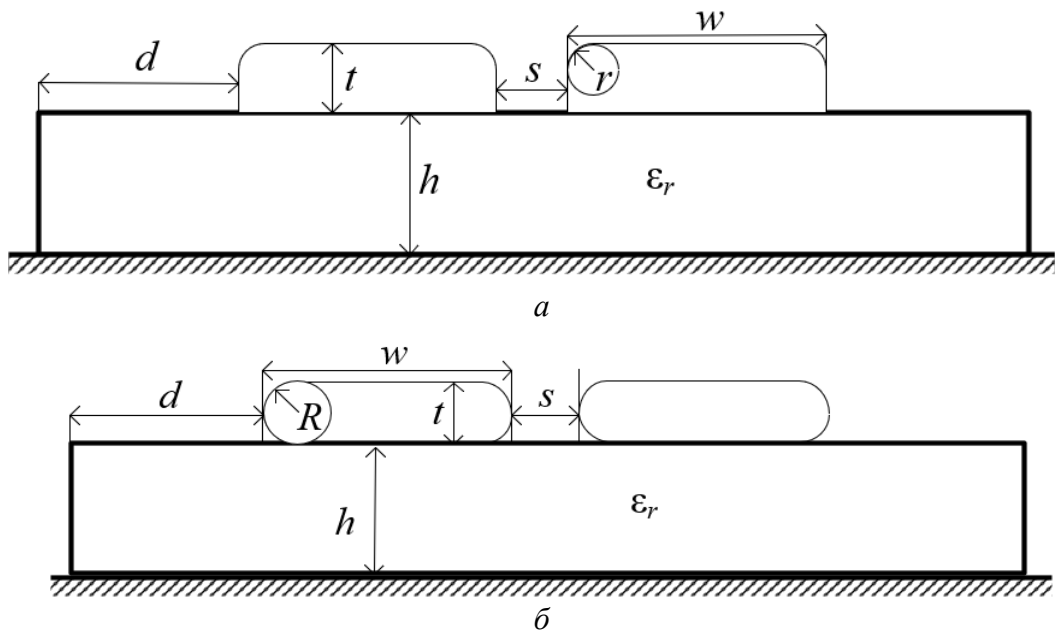


Рис. 1. Поперечные сечения МПЛ с частично (а) и полностью (б) закругленными торцами проводников

### III. Вычислительный эксперимент

В таблицы 1 и 2 сведены полученные различия в матрицах **C** и **L** при  $w = 0,2$  мм и  $0,4$  мм соответственно. Видно, что при  $w = 0,2$  мм изменения матрицы **C** значительны и составляют немногим более 6 %. При этом для матрицы **L** различия менее 0,5 %. При увеличении ширины проводников различия уменьшаются и составляют 4,94 % и 0,19 %.

Таблица 1

Различия в матрицах **C** и **L** по (1) и (2) для МПЛ при  $w = 0,2$  мм и изменении  $t$  и  $R$

$t$ , мкм	$R$	$\Delta c$ , %	$\Delta l$ , %
18	$t$	0,16	0,23
	$1,1t$	1,22	0,20
	$1,6t$	1,08	0,14
35	$t$	0,91	0,26
	$1,1t$	1,52	0,28
	$1,6t$	1,12	0,19
70	$t$	4,03	0,31
	$1,1t$	3,02	0,34
	$1,6t$	1,67	0,25
105	$1,1t$	6,16	0,49
	$1,6t$	3,74	0,34

Таблица 2

Различия в матрицах **C** и **L** по (1) и (2) для МПЛ при  $w = 0,4$  мм и изменении  $t$  и  $R$ 

$t$ , мкм	$R$	$\Delta c, \%$	$\Delta l, \%$
18	$t$	0,26	0,13
	$1,1t$	0,82	0,12
	$1,6t$	0,74	0,09
35	$t$	0,54	0,14
	$1,1t$	0,98	0,16
	$1,6t$	0,74	0,11
70	$t$	2,62	0,12
	$1,1t$	2,00	0,16
	$1,6t$	1,18	0,13
105	$t$	4,94	0,12
	$1,1t$	3,82	0,19
	$1,6t$	2,44	0,17

В таблицах 3 и 4 приведены полученные различия матриц **C** и **L** для МПЛ с полностью закругленными, прямоугольными и трапециевидными торцами проводников при  $w = 0,2$  мм и  $0,4$  мм. Видно, что при увеличении толщины проводников и уменьшении их ширины различия увеличиваются и достигают 7,73% и 3,14% для матриц **C** и **L** соответственно. При этом различия больше относительно МПЛ с прямоугольными торцами.

Таблица 3

Различия по (1) и (2) для МПЛ с полностью закругленными торцами проводников относительно МПЛ с прямоугольными и трапециевидными торцами при  $w = 0,2$  мм и изменении  $t$  и  $R$ 

Тип проводника	$t$ , мкм	$R$	$\Delta c, \%$	$\Delta l, \%$
Прямоугольный	18	$t$	0,48	0,69
		$1,1t$	2,19	0,62
		$1,6t$	2,14	0,37
	105	$1,1t$	7,73	3,14
		$1,6t$	4,92	1,84
Трапециевидный	18	$t$	0,03	0,99
		$1,1t$	1,86	0,65
		$1,6t$	2,13	0,34
	105	$1,1t$	4,74	2,87
		$1,6t$	3,73	1,38

**Различия по (1) и (2) для МПЛ с полностью закругленными торцами проводников относительно МПЛ с прямоугольными и трапециевидными торцами при  $w = 0,4$  мм и изменении  $t$  и  $R$**

Тип проводника	$t$ , мкм	$R$	$\Delta c$ , %	$\Delta l$ , %
Прямоугольный	18	$t$	0,27	0,45
		$1,1t$	1,47	0,40
		$1,6t$	1,46	0,24
	105	$t$	5,28	2,49
		$1,1t$	4,56	2,17
		$1,6t$	3,03	1,27
Трапециевидный	18	$t$	0,02	0,62
		$1,1t$	1,25	0,41
		$1,6t$	1,46	0,21
	105	$t$	2,98	2,74
		$1,1t$	2,89	1,73
		$1,6t$	2,45	0,89

#### IV. Заключение

В работе с использованием метода моментов выполнена численная оценка влияния закругления торцов проводников связанной МПЛ на ее матрицы погонных параметров. Показано, что это влияние значительно и возрастает при увеличении толщины и уменьшении ширины проводников. Поэтому при проектировании МПЛ следует учитывать возможную неидеальность формы торцов проводников, особенно при их использовании в быстродействующих цепях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-00101.

#### Библиографический список

- Сагиева И. Е., Газизов Т. Р., Кирхмаер А. С. Сравнительный анализ микрополосковой линии с прямоугольным и закругленным проводниками // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-28-2022): докл. 28-й междунар. науч.-практ. конф., 16 ноября Томск, 2022. С. 135-140. EDN DYKAEN.
- Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Газизов Т. Т., Квасников А. А., Комнатнов М. Е., Суровцев Р. С. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S5-2 (102). С. 425–432. DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.425.432. EDN CBVKAJ.

*Дата поступления статьи: 31.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© П. П. Снетков, А. Е. Максимов, С. П. Куксенко, 2023



*А. С. Старков<sup>1,2</sup>, В. И. Левченко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «ОНИИП», г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЫСОКОЧАСТНОГО НАГРУЗОЧНОГО БЛОКА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ**

**Аннотация.** Разработаны тепловые модели на основе анализа теплового режима нагрузочного блока номинальной мощностью 2,5 кВт при принудительном охлаждении с центробежным и радиальным типами вентиляторов. Рассмотрены основные аспекты конструкции устройства, тип формирования воздушных потоков, подходы к расчету теплового режима, смоделированы тепловые процессы и даны практические рекомендации о действиях при необходимости замены типов вентиляторов.

**Ключевые слова:** тепловой режим, вентилятор, резистивные пленки, производительность, воздушный поток.

### **I. Введение**

В ходе опытно-конструкторских работ (ОКР) был спроектирован нагрузочный блок (НБ) в составе радиопередающего устройства (РПДУ), рассчитанный на работу в частотном диапазоне от 1,5 до 30 МГц. Основной задачей при проектировании стало обеспечение требуемого теплового режима НБ, при котором обеспечиваются его электрические параметры.

В рамках ОКР для принудительного охлаждения первоначально использовались центробежные вентиляторы, однако в связи с ограничениями зарубежных поставок вентиляторов выбранного типа, а также в связи с необходимостью увеличить рабочую полосу частот до 80 МГц возникла задача по замене вентиляторов на более доступные на рынке.

Целью данной статьи стало описание подходов к построению расчетных моделей в САПР, которые позволяют оперативно вычислить температуру резисторов и произвести замену покупному комплекту (вентилятору).

### **II. Описание конструкции модели**

Конструктивное исполнение нагрузочного блока стандартизовано и имеет серверный форм-фактор 1U с высотой 43,7 мм и девятнадцатидюймовой шириной для монтажа в стойки [1]. Рассеивание мощности обеспечивается группой резисторов, выполненных на основе нитрида тантала на теплопроводных подложках из нитрида алюминия [2].

Первоначальная конструкция НБ включала 14 последовательно-параллельно соединенных пленочных резисторов. Для увеличения полосы рабочих частот НБ до 80 МГц число резисторов было уменьшено с 14 до 7 при последовательном соединении и соответствующем увеличении мощности рассеивания. Это позволило обеспечить более равномерное распределение рассеиваемой мощности между резисторами и расширить АЧХ НБ в связи с минимизацией паразитных емкостей.

Каждая из резистивных пленок, представляющих отдельные резисторы, изготавливалась трапециевидной формы с несколько отличающейся площадью в зависимости от места установки для того, чтобы максимально равномерно распределить тепловое выделение в устройстве (рис. 1).

В случае 14 пленочных резисторов на каждом из них рассеивалась мощность примерно равная 180 Вт на каждом, а в случае семи пленочных резисторов на каждом из них стала рассеиваться мощность от 302 Вт до 412 Вт.

Нитрид тантала выбран в качестве материала для пленочных резисторов из-за его прочности, устойчивости к температурным изменениям, стабильности параметров в требуемом частотном диапазоне, а также с учетом технологической оснащенности предприятия, по заданию которого проводилась разработка НБ.

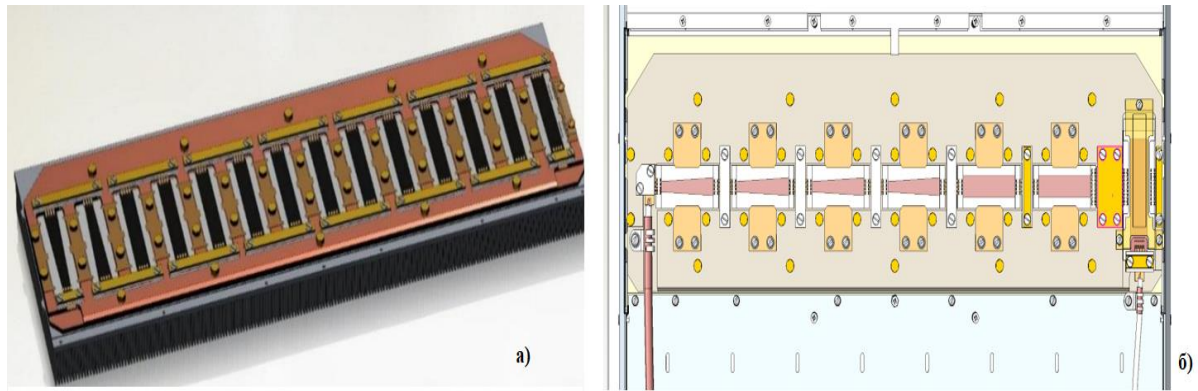


Рис. 1. Конструкция НБ с 14 (а) и 7 (б) резистивными пленками

Теплоотвод от резисторов обеспечен путем их установки на медное основание с использованием термопасты с высокой теплопроводностью 12,5 Вт/(м·К), а медное основание также через термопасту установлено на радиаторы из алюминиевого сплава АМг6.

Принудительное охлаждение в блоке обеспечивается малогабаритными центробежными вентиляторами, подтвердившими свою высокую эффективность при использовании в стойках и блоках РПДУ, благодаря созданию мощного направленного воздушного потока, в несколько раз большего, чем у осевых вентиляторов.

Питание вентиляторов осуществляется от импульсного источника напряжения, выходной сигнал которого фильтруется для ослабления гармоник, при этом благодаря высокому к.п.д. тепловыделение источника вносит несущественный вклад в общее тепловое выделение, что позволит не учитывать его в расчетах.

Вход и выход сигнала осуществляется через высокочастотные разъемы N типа.

### III. Практическая часть

Для определения параметров вентилятора, обеспечивающего необходимый воздухообмен в НБ с повышенной выделяемой мощностью и расширенным частотным диапазоном, в качестве первоначального варианта был исследован центробежный вентилятор, а далее - радиальные вентиляторы.

Практическим способом установлено, что при температуре на резисторах выше 155 °С начинается заметное ухудшение электрических параметров НБ, поэтому указанная температура была принята в качестве допустимой рабочей, а предельная температура была установлена на уровне 175 °С.

В качестве первого шага при проектировании было определено пороговое значение необходимого расхода воздуха для обеспечения заданного теплового режима.

Из формулы для изобарного процесса нагрева газа можно определить количество теплоты по формуле (1):

$$W = c \cdot m \cdot \Delta t = V_{\text{пр}} \cdot (t_{\text{yx}} - t_{\text{пр}}) \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot c, \quad (1)$$

где  $m$  – масса газа, кг,  $\Delta t$  – изменение температуры воздуха, °С,  $V_{\text{пр}}$  – объем приточного воздуха, м<sup>3</sup>/с,  $t_{yx}$  – температура воздуха, выходящего из вентилируемого объема, °С,  $t_{\text{пр}}$  – температура приточного воздуха, °С,  $\rho_{\text{пр}}$  – удельный вес приточного воздуха в кг/м<sup>3</sup>,  $c$  – теплоемкость приточного воздуха, Дж/кг · °С.

Из формулы (1) был выражен и рассчитан объем приточного воздуха  $V_{\text{пр}}$ , м<sup>3</sup>/с:

$$V_{\text{пр}} = \frac{W}{(t_{yx} - t_{\text{пр}}) \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot c} = \left\{ \begin{array}{l} W = 2500 \text{ Вт} \\ t_{yx} = 155 \text{ °С} \\ t_{\text{пр}} = 50 \text{ °С} \\ \rho_{\text{пр}} = 1,109 \text{ кг/м}^3 \\ c = 1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град} \end{array} \right\} \approx 0,02136 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} = 76,9 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Экспериментально было установлено, что воздушный поток вентилятора на расстоянии 0,5 м снижается в два раза; при продувке воздушных масс через решетчатую сетку производительность вентилятора снижается в полтора раза; при продувке воздуха через препятствия типа радиатор поток снижается еще в 1,5 – 2 раза. Исходя из этих полученных экспериментальных данных вытекает необходимость увеличения объема приточного воздуха по сравнению с расчетным в 4 раза, добавив запас на препятствия типа радиатор, тепловыделение модулей питания, фильтров, примерно в 20 %. Таким образом, требуемая производительность вентилятора составила величину, приблизительно равную 370 м<sup>3</sup>/ч.

В качестве среды моделирования была выбрана SOLIDWORKS Flow Simulation, которая производит расчеты по методу конечного объема, что обеспечивает среднюю погрешность расчетов в размере 5 %.

#### IV. Исследовательская часть

Для исследования путем моделирования была выбрана конструкция с центробежными вентиляторами производительностью 80 м<sup>3</sup>/ч и высоким давлением – RLF 100–11/18/2HP-182, немецкой фирмы Ebm-papst [3]. Исходя из форм-фактора блока в нем можно разместить три вентилятора с суммарной производительностью 240 м<sup>3</sup>/ч, но применение центробежного вентилятора позволяет в среднем в 1,5 раза, снизить требуемое значение производительности вентилятора до 247 м<sup>3</sup>/ч, за счет уменьшения расстояния до охлаждаемого объекта и других факторов. Суммарная производительность центробежных вентиляторов незначительно отличается от требуемой и может считаться допустимой (см. рис. 2; крышка, модули питания, фильтры не показаны).

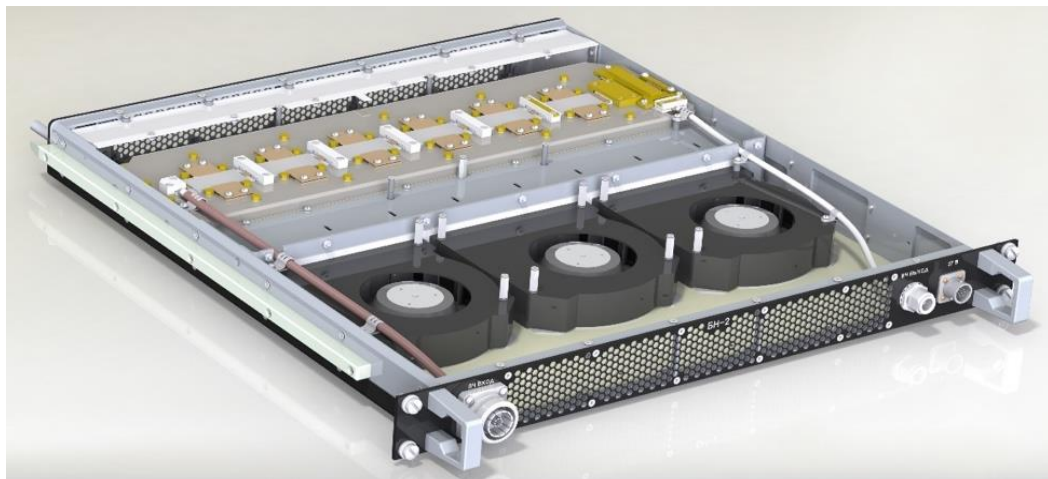


Рис. 2. Конструкция блока с центробежными вентиляторами

Результаты моделирования показали (рис. 3), что температуры резисторов, в среднем, составляют 150 °С, при этом максимальное значение составляет 172,89 °С. Сравнивая, результаты моделирования с предыдущими данными [2], можно утверждать, что значения выросли в зависимости от величины падающей мощности, но при этом их величины можно считать допустимыми.

Таблица 1

**Технические параметры центробежного вентилятора для расчёта**

Параметр	Значение
Мощность, Вт	17
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	80
Типоразмер, мм	127x127x25
Частота вращения, об/мин	6400
Рабочая температура, °С	от -20 до 70

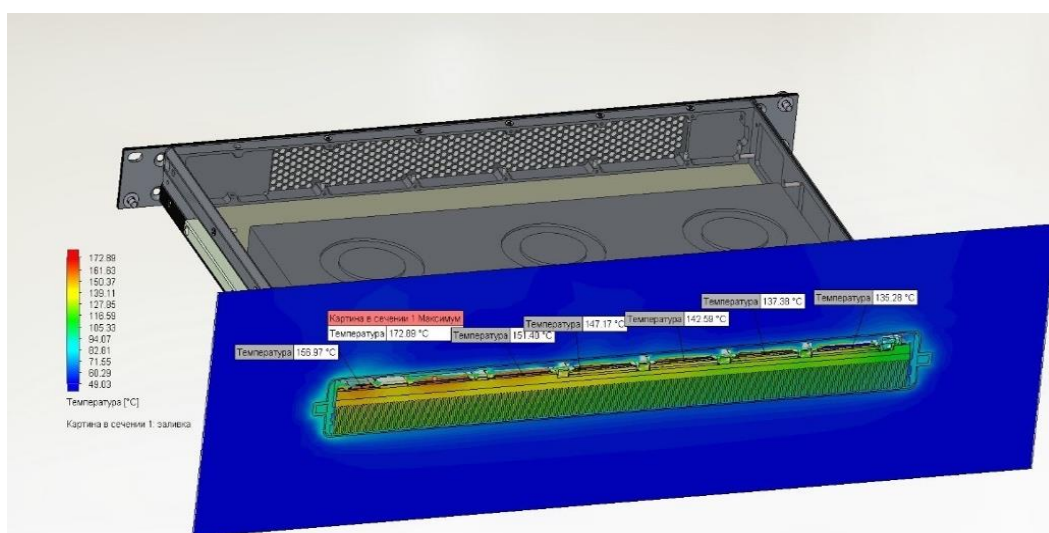


Рис. 3. Температуры на резистивных пленках

Таким образом, установив связь между температурой на резисторах и необходимой производительностью вентиляционной системы, мы получили возможность обоснованно производить замену типов вентиляторов.

В качестве альтернативных поставщиков радиальных вентиляторов были выбраны две фирмы: российская компания «ИОЛЛА» (вентилятор 0,36ЭВ-0,2-6-4625) и китайская компания «SUNON» (вентилятор PF40281B1-S99). Существуют производители вентиляторов с требуемыми параметрами и из ряда других стран, допускающих экспорт в РФ, но компания «SUNON» выбрана, как наиболее доступная на рынке продаж.

Таблица 2

**Технические параметры радиального вентилятора фирмы «ИОЛЛА»**

Параметр	Значение
Мощность, Вт	3,6
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	20
Типоразмер, мм	41x41x29
Частота вращения, об/мин	9500
Рабочая температура, °С	от -40 до 70



На рис. 4 представлена конструкция БН с отечественными вентиляторами

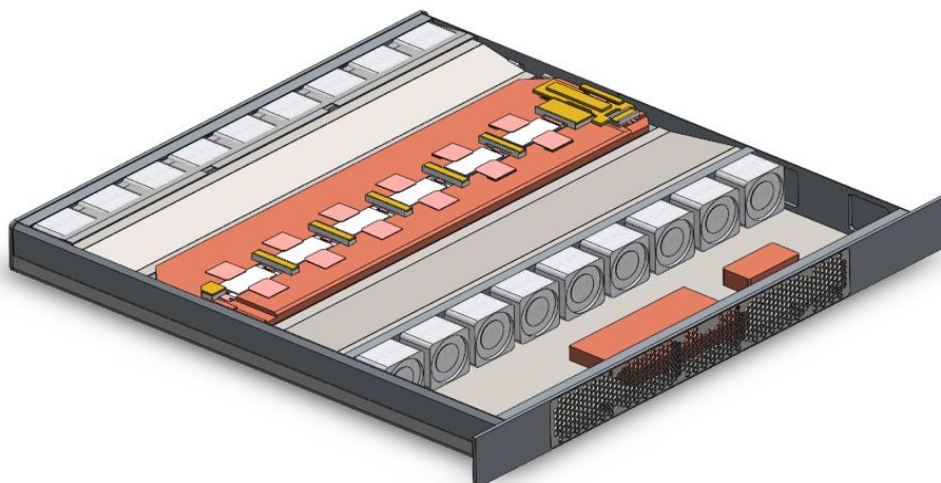


Рис. 4. Конструкция блока с осевыми вентиляторами фирмы «ИОЛЛА»

Результаты моделирования тепловых режимов БН с радиальными вентиляторами фирмы «ИОЛЛА» приведены на рис. 5.

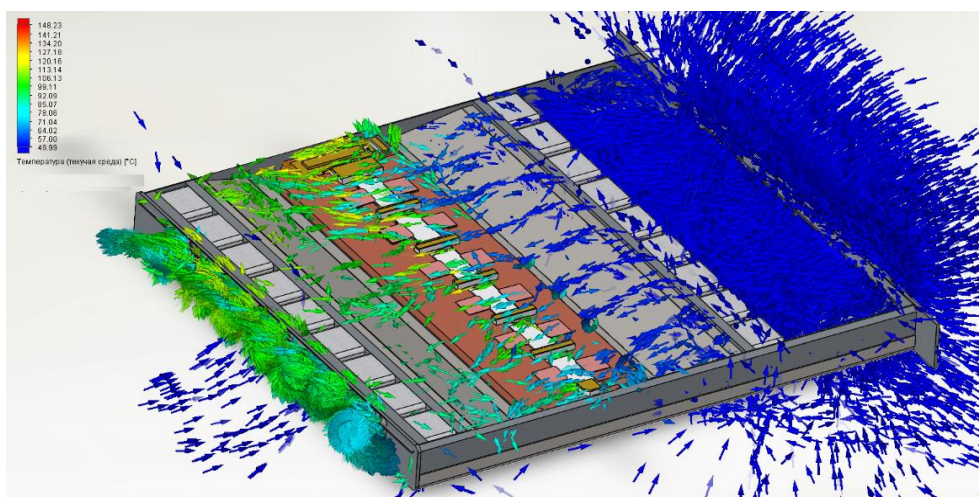


Рис. 5. Распределение температуры воздушного потока

Установлено, что использовать вентиляторы других фирм по типу приточно-вытяжной системы нет возможности из-за отсутствия вентиляторов с рабочей температурой не менее 130 °С ни у отечественных предприятий, ни у зарубежных фирм. Поэтому необходимо использовать более производительные вентиляторы по приточной схеме расположения.

В качестве такого подхода был выбраны высокопроизводительный и доступный для импорта вентилятор PF40281B1-S99 фирмы «SUNON».

Таблица 3

**Технические параметры радиального вентилятора фирмы «SUNON»**

Параметр	Значение
Мощность, Вт	6,1
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	42,3
Типоразмер, мм	40x40x28
Частота вращения, об/мин	17600
Рабочая температура, °С	от -10 до 70

Результаты моделирования тепловых режимов блока с радиальными вентиляторами фирмы «SUNON» приведены на рис. 6.

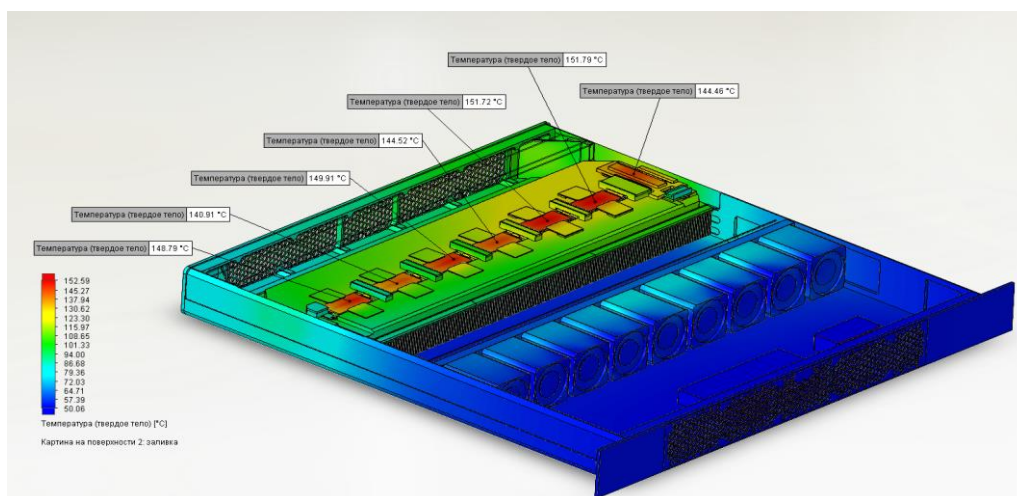


Рис. 6. Температуры на резистивных пленках

По результатам моделирования установлено, что значения температур на резисторах в среднем составляют 145 °С при максимуме 151,49 °С и, таким образом, температурный режим не нарушается.

## V. Заключение

Построены три модели тепловых режимов в нагрузочном блоке.

Первая модель основана на импортных центробежных вентиляторах с высоким давлением воздушного потока, за счет чего удается скомпенсировать отсутствие необходимого объема приточного воздуха.

Вторая модель спроектирована на основе радиальных отечественных вентиляторов, но из-за ограничения их собственной рабочей температуры такое решение подойдет для серверных блоков, рассчитанных на меньшую мощность, например, на 1 кВт.

Третья модель построена по приточной системе на доступном на рынке импортном радиальном вентиляторе. За счет его двухкратного превосходства по сравнению с самым мощным отечественным вентилятором удалось обеспечить рекомендуемый тепловой режим с небольшим запасом.

Полученные модели позволяют произвести необходимую модернизацию блока под доступный тип вентилятора. Для этого достаточно выбрать центробежный вентилятор с производительностью не менее 80 м<sup>3</sup>/ч и размерами, ориентировочно, равными 127x127x25 мм, или радиальный вентилятор с примерными параметрами, указанными в таблице 3.

Что касается фирм, которые выпускают подходящие типы вентиляторов, то анализ показал, что в будущем, по мере усовершенствования характеристик вентиляторов, появится перспектива применения в рассматриваемом НБ у продукции отечественных компаний «ИЮЛИА», «REXANT», «DEXP». В этой связи, в случае необходимости замены выбранного в данной работе вентилятора, стоит рассматривать производителей из таких стран, как Мексика (производитель SanAce), КНР (производитель Coolsox) и вентиляторы, поставляемые по схеме параллельного импорта.

## Библиографический список

1. ГОСТ Р МЭК 60297-3-106-2020. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Введ. 2020-11-24. М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.

2. Корж И. А., Николаенко К. В., Чукавов Е. А. [и др.]. ВЧ нагрузки большой мощности для радиопередающих устройств // Радиотехника, электроника и связь (РЭС-2017): Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции. 15-16 ноября 2017. Омск: ОНИИП, 2017. С. 395–401. EDN YOSTUL.

3. Вентилятор RLF 100-11/18/2 HP-182 / RLF10011182HP182 компактный радиальный Ebmpapst. М.: официальный сайт. URL: [https://ebmpapst-rus.ru/catalog/ventilyator\\_ebmpapst\\_rlf100\\_11\\_18\\_2hp\\_182\\_radialnyy/](https://ebmpapst-rus.ru/catalog/ventilyator_ebmpapst_rlf100_11_18_2hp_182_radialnyy/) (дата обращения 17.03.23).

*Дата поступления статьи: 19.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 27.03.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. С. Старков, В. И. Левченко, 2023

УДК 623.746.7

*Р. В. Степанов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОБЛУЧЕНИИ**

**Аннотация.** В статье предлагается методика проверки системы предупреждения об облучении при помощи специального оборудования. Представленное устройство позволяет получать информацию о ходе проверки в короткие сроки, оснащено системами самоконтроля, повышающими точность измерений, и может использоваться в экстремальных погодных условиях.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, система предупреждения об облучении, радиоканал, цифровой интерфейс.

### **I. Введение**

Использование радиолокационных станций на судах, истребителях и сухопутных объектах со временем получило широкое распространение. Системы, включающие в себя радиолокационные станции, не редко используются для наведения средств поражения на различные объекты [1-3].

Для предупреждения о попадании в зону действия радиолокационной станции предполагаемого противника все современные пилотируемые летательные аппараты военного назначения оснащаются системой предупреждения об облучении (СПО). СПО представляет собой комплект бортового радиоэлектронного оборудования, состоящий из нескольких антенн, блоков пеленгаторов, блока приемника и бортового компьютера.

Бортовой компьютер, после обработки поступающей информации, с приемных устройств, способен путем сравнения параметров полученного сигнала с данными об излучении, используемым в различных радиолокационных станциях, определить тип источника. Это может быть наземная радиолокационная система, расположенная на зенитной установке, или бортовое радиолокационное оборудование, установленное на перехватчике.

Обработанная информации о характере и типе излучения отображается на блоке индикации летательного аппарата. Таким образом, экипаж воздушного судна способен получить основную информацию об источнике электромагнитного излучения и сделать соответствующие выводы, относительно своих дальнейших действий в зоне облучения.

Система предупреждения об облучении является одной из важнейших систем защиты современных воздушных объектов, поэтому необходимо тщательно следить за ее работоспособностью, и при появлении первых признаков некорректной работы провести комплекс мероприятий, направленный на скорейшие приведение системы в рабочее состояние.

## II. Общее устройство прибора для проверки СПО

Для проверки работоспособности системы используют специальное оборудование, для наблюдения за работоспособностью СПО при облучении ее разными типами электромагнитных волн.

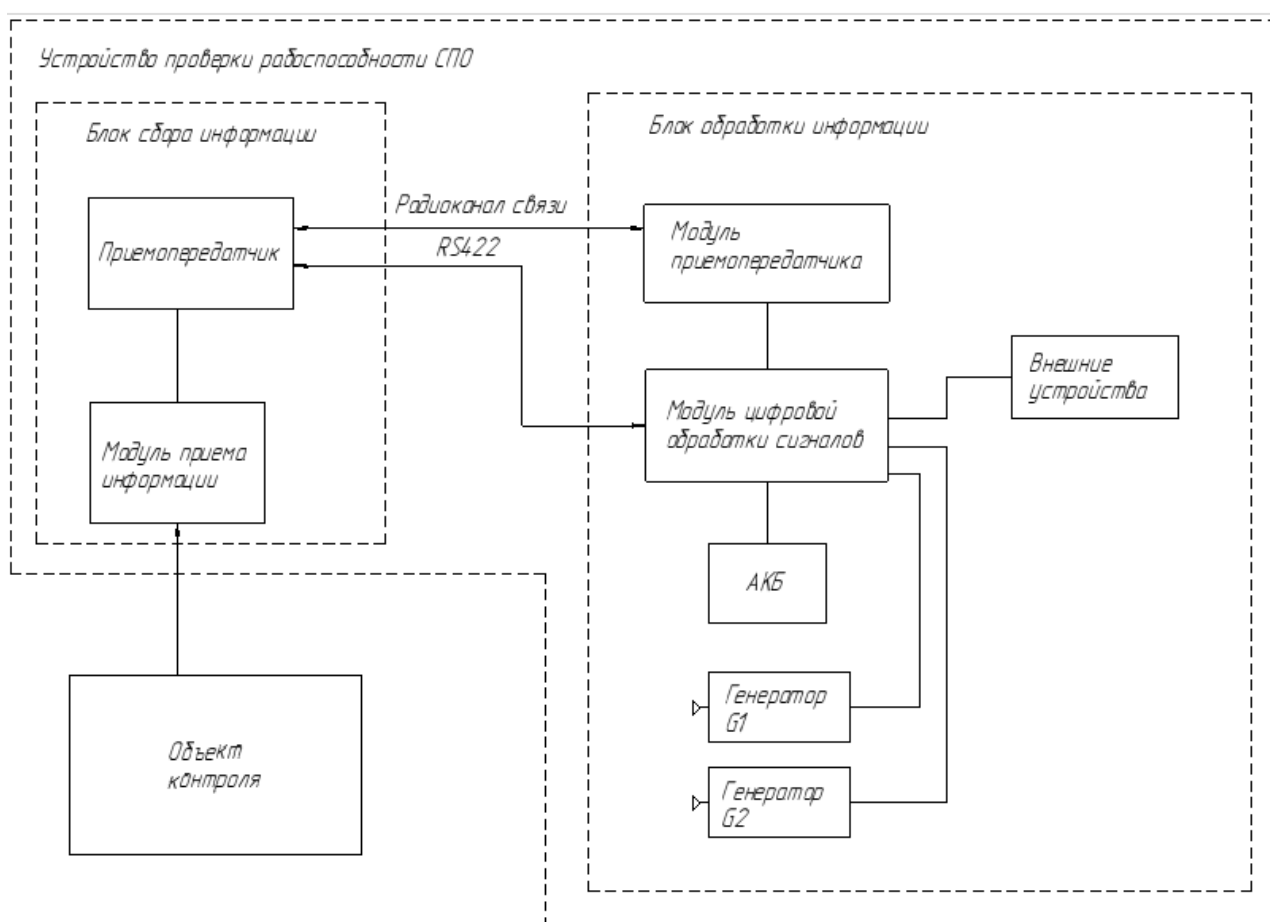


Рис. 1. Структурная схема оборудования для тестирования СПО

Устройство для проверки работоспособности СПО включает в себя блок сбора информации и блок обработки информации. Блок сбора информации состоит из модуля приема информации и приемопередатчика. Блок сбора информации подключается к блоку СПО воздушного судна и собирает информацию о наличии и типе зафиксированного излучения, после чего передает полученную информацию в приемопередатчик.

Приемопередатчик предназначен для передачи информации по двухстороннему радиоканалу, работающему по стандарту LPD-433. Также, при отсутствии возможности



работы при помощи радиоканала, возможно использование интерфейса RS-422, однако это будет иметь свои ограничения по дальности и мобильности.

Блок обработки информации предназначен для индикации результатов проверки, зафиксированных системой. Он состоит из следующих частей: приемопередатчика, внешних устройств, модуля цифровой обработки сигналов, аккумуляторной батареи и двух генераторов G1 и G2.

Приемопередатчик предназначен для связи по радиоканалу с блоком сбора информации.

Электропитание блока сбора информации осуществляется от бортовой электрической сети летательного аппарата. Блок обработки информации может получать электропитание от аккумуляторов, что значительно повысит мобильность оператора. При получении информации через цифровой RS-422 электропитание осуществляется по кабелю от бортовой сети летательного аппарата. Внешние устройства предназначены для сбора данных из окружающей среды и вывода полученной информации. Генераторы G1 и G2 предназначены для формирования электромагнитных волн различных типов.

Устройство оснащено системами самоконтроля, что позволяет существенно снизить возможность получения недостоверных данных о работоспособности системы СПО. Подбор соответствующей элементной базы делает возможным использование прибора в экстремальных погодных условиях.

### **III. Принцип работы устройства**

После включения прибора, оператор выбирает тип электромагнитных волн. Генераторы, в зависимости от выбранного режима работы, формируют электромагнитные волны в заданном диапазоне. СПО, расположенная на объекте контроля, фиксирует наличие электромагнитных волн и передает информацию о характере и типе излучения в бортовой компьютер летательного аппарата.

Блок сбора информации копирует данные, поступающие в блок СПО, и при помощи приемопередатчика передает данные в блок обработки информации по радиоканалу или через интерфейс RS-422. Блок обработки информации фиксирует поступившие данные, после чего выводит через внешнее устройство результаты проведенных испытаний.

### **IV. Заключение**

В работе было рассмотрено устройство для проверки СПО. Проверка системы защиты ЛА при помощи представленного устройства имеет ряд преимуществ.

1. Широкий диапазон рабочих температур, позволяющий проводить проверку системы защиты летательного аппарата в экстремальных условиях.
2. Наличие систем самоконтроля существенно уменьшает возможность получения неверных результатов испытания.
3. Возможность обмена данными по радиоканалу повышает мобильность оператора.
4. Мгновенное получение результатов проверки системы СПО.

Научный руководитель: Павел Иванович Пузырёв, Омский государственный технический университет.

### **Библиографический список**

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. В двух частях. Часть 2. Антенны. М.: Советское радио, 2018. 328 с.
2. Попов В. С. Общая электротехника с основами электроники М.: ЁЁ Медиа, 2019. 250 с.

3 Баркан В. Ф., Жданов В. К. Радиоприемные устройства. М.: Советское радио, 2020. 462 с.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Р. В. Степанов, 2023

УДК 551.51.81

*Я. А. Сурков*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК  
В МОБИЛЬНЫХ РАДАРНЫХ УСТАНОВКАХ  
С ЦЕЛЬЮ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И ПЫЛЬНЫХ БУРЬ**

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются потенциально перспективные технологии цилиндрических фазированных антенных решеток, которые могут быть полезны в задачах мониторинга таких явлений, как лесные пожары и пыльные бури. Данные явления представляют особую опасность, в том числе для регионов России и Казахстана. Установлено, что мобильные радарные установки на основе цилиндрических фазированных антенных решеток, работающие в нескольких различных диапазонах, с достаточной точностью способны определять параметры перечисленных выше явлений. В работе предлагается обобщенная концепция реализации такой установки.

**Ключевые слова:** фазированная антенная решетка; мобильная радарная установка; пожар; пыльная буря; метеорология.

**I. Введение**

Необходимость оперативного прогнозирования и мониторинга таких явлений, как пожары и пыльные бури, в последние годы приобрела особую актуальность. Особенно остро данная проблема стоит в регионах Южного федерального округа, южного Поволжья, Урала, Западной и Восточной Сибири, Дальневосточного федерального округа, а также всех без исключения регионов Казахстана [1-6]. В данной местности происходит постепенное опустынивание земель, связанное с миграцией песков с территории Средней Азии, а также ежегодным увеличением барических образований с высоким и низким давлением в центре – антициклонов и циклонов. В антициклонах преобладают воздушные массы с очень низким процентным содержанием влаги, в связи с чем, днем воздух активно прогревается, а ночью сильно выхолаживается. Влага, находящаяся в почве, в таких условиях мгновенно испаряется. В циклонах же присутствуют контрастные воздушные массы. Контраст может составлять порядка 30 - 40 градусов. В данных условиях циклоны активно углубляются, увеличивается барический градиент, происходит резкое усиление ветра, вследствие чего в воздух поднимается огромное количество пыли и песка. Пожары возникают в связи с ударами молний и, по большей части, с человеческим фактором. Небольшие очаги возгорания прогрессируют в условиях сухой и ветреной погоды, по итогу перерастая в

обширные огненные фронты, протяженностью более 30 км [7-8]. Данные явления наносят значительный ущерб сельскому хозяйству и инфраструктуре поселков городского типа, зачастую влекут за собой человеческие жертвы [9].

## **II. Основные принципы построения радиолокационных установок**

Радиолокационные системы способны работать в различных частотных диапазонах. В метеорологических целях в основном применяются диапазоны S (длина волны 8 - 15 см), C (4 - 8 см), X (2,5 - 4 см), Ka (0,75 - 1,2 см) и W (0,1 - 0,75 см) [10]. Электромагнитные волны диапазона S лучше всего подходят для мониторинга опасных конвективных явлений (торнадо, градобития, конвективные шквалы). Радиолокаторы с диапазонами C и X имеют более высокую степень чувствительности, чем диапазон S, но более крупные частицы (дождь, снег, град, крупа, частицы золы и песка) соизмеримы и даже могут превышать значения длин волн этих диапазонов, следовательно, эффекты резонансного рассеяния усложняют физическую интерпретацию сигналов, отражаемых от аэрозолей (гидрометеоров). Диапазоны Ka и W часто применяются для наблюдений за метелями, лесными пожарами, пыльными бурями, переохлажденным дождем, крупой, изморосью, туманом, а также частицами облаков.

В идеале радары должны предоставлять специалистам информацию об интересующих параметрах на максимально возможной дальности с наилучшим пространственным разрешением и максимальной частотой дискретизации. Однако каждая полоса частот характеризуется своими физическими и техническими преимуществами и ограничениями, требующими принятия компромиссного решения. Особо важными, взаимосвязанными характеристиками являются транспортабельность, угловое разрешение и затухание. Затухание зависит от формы и количества аэрозолей (гидрометеоров), их концентрации в выбранной области, состава и размера по отношению к длине волны – в одних и тех же условиях повышенное затухание наблюдается у более коротких волн, что ограничивает эффективную дальность наблюдений. Угловое разрешение увеличивается с повышением частоты и размера апертуры антенны радара, что напрямую влияет на транспортабельность и пространственное разрешение. Например, радарам S диапазона требуется большая апертура по сравнению с радаром C и X диапазонов для создания максимально узкого луча, что пагубно сказывается на возможности транспортировки радиолокационной установки. Радары, работающие в диапазонах C и X и на более коротких волнах, могут иметь меньшую апертуру из-за меньшей длины волны, что позволяет им работать на мобильных платформах для повышения пространственного разрешения и ограничения влияния, оказываемого затуханием. При этом короткие волны обеспечивают высокое угловое разрешение, подходящее для изучения атмосферных явлений, происходящих в мелких пространственных масштабах [11-12].

## **III. Главные особенности фазированных антенных решеток**

Фазированная антенная решетка (ФАР) – это массив излучателей, в которых относительные фазы сигналов изменяются таким образом, что эффективное излучение решетки усиливается только в строго определенном направлении, при этом, подавляется в остальных. Луч формируется путем сдвига фазы сигнала, излучаемого каждым элементом ФАР таким образом, чтобы возникала их интерференция в фазе, либо противофазе, с целью поворота луча для сканирования в определенном направлении [13].

Различают пассивные и активные ФАР. В пассивной решетке используется единственный передатчик, излучающий на определенной частоте. Передаваемая мощность распределяется по всей матрице элементов. В такой решетке содержится один основной луч, при этом управление на каждом элементе массива можно осуществлять по отдельности. Такие системы больше подвержены влиянию внешних помех, но имеют более простую и

дешевую конструкцию, а диаграмма направленности луча, в свою очередь, имеет максимумы в интересующем направлении.

В случае активной ФАР (АФАР) функции приема и передачи реализуются на каждом элементе матрицы. Радар на основе данной антенной решетки может фиксировать несколько целей одновременно благодаря усовершенствованным алгоритмам. Радиолокатор с АФАР более устойчив к внешним помехам и может генерировать несколько лучей в определенных направлениях [14].

К уникальным возможностям ФАР следует отнести электронное управление лучом, которое позволяет проводить необходимые измерения с такой же точностью при более коротком времени наблюдения за интересующим явлением (порядка 10-30 секунд), как и при использовании обычной параболической антенны с механическим управлением лучом. Более короткое время наблюдения приводит к более оперативному обновлению данных и дает возможность подробного анализа полученных характеристик интересующего явления. Ключевым преимуществом ФАР над параболическими антеннами является способность практически мгновенно направлять луч радара под разными углами в пределах выбранного сектора сканирования без механического вращения системы, приводящей к значительному износу механических частей конструкции. Сканирование выбранного сектора радаром с параболической антенной занимает заметно больше времени (3-5 минут). Цифровое формирование луча происходит посредством цифрового объединения сигналов, полученных от элементов ФАР. Основной принцип заключается в том, что энергия обратного рассеяния принимается из широкого сектора, освещенного падающим лучом, а сигналы оцифровываются в различных положениях в плоскости ФАР [15].

Различают эквидистантные и неэквидистантные ФАР. В случае эквидистантных ФАР промежутки между элементами массива одинаковы. Расстояния между излучателями в таких ФАР выбираются относительно небольшими, зачастую меньше длины волны. Это позволяет формировать в секторе сканирования остронаправленную диаграмму направленности с одним главным лепестком без паразитных лучей и низким уровнем боковых лепестков. Однако для того, чтобы сформировать узкий луч, необходимо реализовать ФАР с достаточно большим массивом элементов. В случае неэквидистантных ФАР элементы находятся на различных расстояниях друг от друга. В данных ФАР при различных расстояниях между соседними элементами можно избежать образования паразитных лучей и получить диаграмму направленности с одним главным лепестком [16]. Это позволяет формировать очень узкий луч при сравнительно небольшом числе элементов, но такие ФАР с малым числом излучателей имеют более высокий уровень боковых лепестков и, соответственно, более низкий коэффициент направленного действия, чем ФАР с большим числом элементов.

#### **IV. Цилиндрическая фазированная антенная решетка**

Цилиндрическая антенная решетка (ЦАР) – это массив элементов, размещенных на цилиндрической поверхности. Элементы данной решетки ориентированы таким образом, что направление максимума диаграммы направленности каждого из них совпадает с направлением радиуса ФАР в месте расположения элемента. ЦАР – это выпуклая кольцевая решетка. Данные решетки имеют множество достоинств, например: относительно слабая взаимная связь излучателей по причине значительного пространственного разворота их осей (в отличие от плоских ФАР); возможность проведения сканирования при повороте на любой угол лучом установленных ширины и формы в азимутальной плоскости; возможность и удобство размещения подобных ФАР на передвижных объектах, в том числе на автомобилях. К их недостаткам относится сложность возбуждения излучающих элементов. На таких решетках можно сформировать несколько лучей и сканировать ими в интересующих направлениях. Для этого необходимо создать нужное число излучающих участков. Такой режим работы антенной решетки достаточно сложен в реализации и требует

специальных устройств возбуждения излучателей, как было сказано выше. Для формирования узкого луча и полнообъемного сканирования антенным решеткам данного типа необходима независимая регулировка амплитуды и фазы возбуждения на каждом элементе массива. Энергию между элементами цилиндрических ФАР можно разделить двумя способами – фидерным и пространственным. При фидерном возбуждении энергию к излучателям подводят с помощью отрезков волноводной или коаксиальной линии передачи и делителей мощности. Для формирования луча в интересующем направлении на излучающем участке цилиндрической ФАР необходимо создать такое фазовое распределение, при котором электромагнитные поля, излучаемые каждым элементом, складываются синфазно в интересующем направлении.

#### **V. Концепция предлагаемой радарной установки**

Модель предлагаемой установки состоит из радара на основе ФАР цилиндрического типа, работающего в Ka или W диапазоне, размещенного на пьедестале, который, в свою очередь, будет размещен в грузовике или фургоне, обеспечивая при этом высокую мобильность, а также пирометрических измерителей большой дальности. Разнородные данные, фиксируемые радаром и пирометрическими измерителями, должны своевременно передаваться по помехоустойчивым и защищенным криптографическими методами каналам связи в передвижной или стационарный диспетчерский пульт накопления и централизованной обработки информации с целью принятия оперативных решений и передачи необходимых сведений о текущем развитии ситуации соответствующим государственным службам.

#### **VI. Заключение**

В ходе проведенного исследования было установлено, что цилиндрическая ФАР обладает наиболее предпочтительными характеристиками, применительно к задачам мониторинга лесных пожаров и пыльных бурь, нежели плоская ФАР. Определен приблизительный частотный диапазон, в котором будет работать радар. Несомненно, требуется провести дополнительные эксперименты, включающие в себя полевые компании, где будут наблюдаться интересующие явления, а также проработать вопросы баланса стоимости и эффективности применения данной установки. В любом случае, важность и актуальность рассматриваемой проблемы мониторинга лесных пожаров и пыльных бурь явно дает понять, что необходимо активизировать научно-исследовательские работы в данном направлении.

Научный руководитель: Антон Борисович Ионов, Омский государственный технический университет.

#### **Библиографический список**

1. Глушко А. Я., Разумов В. В., Рейхани М. Д. Деградация земель юга европейской части России под воздействием пыльных бурь // Юг России: экология, развитие. 2010, Т. 5. № 1. С. 146–151. EDN NDWLAZ.
2. Иванова А. Р., Скриптунова Е. Н., Комасько Н. И., Завьялова А. А. Эпизоды пыльных бурь на аэродромах азиатской части Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2(380). С. 20–42. DOI:10.37162/2618-9631-2021-2-20-42. EDN JBKSNU.
3. Матвеева А. Г. Динамика лесных пожаров на Дальнем Востоке России // Сибирский лесной журнал. 2021. № 6. С. 30–38. DOI:10.15372/SJFS20210603. EDN NYXBFC.
4. Орловский Н. С., Орловская Л., Индуиту Р. Опасные и особо опасные пыльные бури в Средней Азии // Аридные экосистемы. 2013. № 4. С. 49–58. EDN ROMLWD.

5. Исанова Г. Т., Базарбаева Т. А., Устемирова А. М. Пыльные и песчаные бури Приаралья // Географические серии. 2015. № 2. С. 161–165.
6. Раимбеков К. Ж., Кусаинов А. Б. Анализ пожаров в республике Казахстан методами математической статистики // Пожаровзрывобезопасность. 2018. № 2–3. С. 75–81.
7. Вакуров А. Д. Лесные пожары на Севере. М.: Изд-во «Наука», 1975. 100 с.
8. Pretorius I., Sturman A., Strand T., Katurji M., Pearse G. A Meteorological Study of the Port Hills Fire, Christchurch, New Zealand // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2020. Vol. 59. Issue 4. P. 263–280. DOI:10.1175/JAMC-D-19-0223.1.
9. Гончаренко В.С., Чечетина Т.А., Сибирко В.И. [и др]. Пожары и пожарная безопасность // Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. Балашиха: П 46 ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
10. Jones T.A., Christopher S.A., Petersen W. Dual-Polarization Radar Characteristics of an Apartment Fire // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. Vol. 26. Issue 10. P. 2257–2269.
11. Brown R.A., Wood V.T., Sirmans D. Improved WSR-88D Scanning Strategies for Convective Storms // Weather and Forecasting. 2000. Vol. 15. Issue 2. P. 208–220.
12. Довиак Р, Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 256 с.
13. Кудин В.П. Плоская фазированная антенная решетка из вибраторов V-типа // Доклады БГУИР. 2007. №1. С. 42–48.
14. Степаненко В.Д., Тхамоков Б.Х. Методы активной и пассивной радиолокации в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 138 с.
15. Шишлов А.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Анпилогов В.Р., Денисенко В.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи // Журнал радиоэлектроники. 2018. №7. С. 1–40.
16. Парфенов В.И., Струков И.Ф., Кунаева Н.А., Струков К.А. Способы изменения формы диаграммы направленности фазированной антенной решетки миллиметрового диапазона // Вестник ВГУ. 2018. №1. С. 33–41.

*Дата поступления статьи: 28.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Я. А. Сурков, 2023

УДК 621.396: 521.19

*Д. А. Титов, А. С. Табакова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В УСТРОЙСТВАХ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ**

**Аннотация.** Исследована компьютерная модель цифрового фильтра на основе характеристической функции А. Ляпунова. Результаты исследований показывают, что в данном цифровом фильтре возникает эффект стохастического резонанса. Выявленные

закономерности позволяют найти параметры полезного сигнала и шума, для которых в цифровом фильтре будет существовать явление стохастического резонанса.

**Ключевые слова:** цифровой фильтр; стохастический резонанс; характеристическая функция А. Ляпунова.

## I. Введение

В ряде работ [1–3] рассмотрена и исследована фильтрация смеси сигнала и шума с использованием характеристической функции (ХФ) А. Ляпунова. В работе [2] изучены фильтрующие свойства ХФ, введены уравнения фильтрации, показан положительный эффект от фильтрации шума. В частности, в данных работах представлены кривые, характеризующие подавление сигнала и шума в зависимости от отношения сигнал/шум. Опубликованные результаты исследований свидетельствуют о том, что цифровые фильтры на основе ХФ эффективны, а также показывают хорошие результаты подавления шума при малых отношениях сигнал/шум. Кроме того, в работе [1] показано, что цифровые фильтры на основе ХФ по-разному воздействуют на нецентрированный квазидетерминированный сигнал и шум, при этом шум подавлен гораздо сильнее. В работе [1] отмечено, что зависимость подавления сигнала и шума от отношения сигнал/шум демонстрирует появление стохастического резонанса [4, 5]. Таким образом, целью данной работы является изучение эффекта стохастического резонанса в цифровых фильтрах на основе ХФ А. Ляпунова.

## II. Постановка задачи

Пусть аддитивная смесь представлена суммой

$$z(t) = u(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $u(t)$  – квазидетерминированный сигнал, а  $n(t)$  – «белый» шум;  $t$  – время. В соответствии с работой [1] оценка действительной части ХФ может быть определена выражением

$$\hat{A}_z(V, t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \cos[z(k\Delta t) \cdot V], \quad (2)$$

где  $V$  – параметр ХФ;  $z(k\Delta t)$  –  $k$ -ое дискретное мгновенное значение аддитивной смеси сигнала и шума, взятое в момент времени  $t = t_0 + k\Delta t$  при  $t_0 = 0$ ;  $\Delta t$  – интервал дискретизации;  $N$  – объем выборки мгновенных значений аддитивной смеси. Аналогично можно определить оценку мнимой части ХФ

$$\hat{B}_z(V, t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sin[z(k\Delta t) \cdot V]. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) могут быть использованы для построения устройств измерения оценок ХФ, либо в качестве алгоритмов цифровой фильтрации сигналов [1–2].

Если предположить, что устройства измерения оценки ХФ будут иметь реализацию, подобную линейному цифровому фильтру, то выражения (2) и (3) могут быть переписаны в виде [3]

$$\hat{A}_z(V, k\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \cos[z((k-l)\Delta t) \cdot V], \quad (4)$$

$$\hat{B}_z(V, k\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \sin[z((k-l)\Delta t) \cdot V], \quad (5)$$

где  $l$  – целое число. Далее в статье использована оценка мнимой части ХФ, т.е. алгоритм (5). Устройство с алгоритмом (5) является нелинейным и, в соответствии с работой [4], в нем возможно возникновение эффекта стохастического резонанса. Таким образом, задачей данной работы является выявление и изучение возникновения эффекта стохастического резонанса в цифровом фильтре с алгоритмом функционирования (5).

### III. Результаты экспериментов

В пакете Matlab была разработана имитационная модель цифрового фильтра с алгоритмом (5). В качестве входного сигнала модели использовались дискретные значения смеси (1), которые определяются в соответствии с выражениями

$$z(k\Delta t) = u(k\Delta t) + n(k\Delta t), \quad (1a)$$

$$u(k\Delta t) = U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_d} k + \eta\right), \quad (6)$$

где  $f_d = 1/\Delta t$  – частота дискретизации;  $f_0$  – частота сигнала;  $U_0$  – амплитуда сигнала (постоянная величина);  $\eta$  – начальный угол сдвига фазы сигнала (случайная величина с равномерным законом распределения на интервале  $-\pi \dots +\pi$ ). Шум  $n(t)$  характеризуется интенсивностью (энергией)  $\sigma_{ш}^2$ . Для экспериментального определения явления стохастического резонанса на вход имитационной модели при  $N = 5$  подавались сигналы (1a) с различным сочетанием параметров. В функции синуса аргумент представлялся в радианах.

Анализ формы сигналов на выходе цифрового фильтра с алгоритмом функционирования (5) позволяет сказать, что при  $U_0 = 0,5$  его выходной сигнал по форме соответствует входному сигналу (рис. 1). При возрастании амплитуды  $U_0$  до значений  $\pi/2$  и более форма выходного сигнала начинает отличаться от формы входного сигнала. На рис. 1 также показаны формы выходного сигнала фильтра при действии на его входе сигнала при  $U_0 = 1,5$  и  $2,0$ . Амплитуды выходных сигналов при  $U_0 = 1,5$  и  $2,0$  на рис. 1 ограничены значениями  $\pm 1$ . В результате этого у сигналов на выходе цифрового фильтра (5) появляются горизонтальные плато. На рис. 2 показан выходной сигнал цифрового фильтра при  $U_0 = 1,6$ , на данном рисунке горизонтальные плато хорошо видны. Для того, чтобы зафиксировать нахождение отсчета сигнала на плато, можно ввести пороги  $\pm\Pi$  определенного уровня.

Эксперимент начинался с исследования воздействия на цифровой фильтр слабого периодического сигнала амплитудой  $U_0 = 0,6$ . Установлено, что при воздействии такого сигнала выходной сигнал цифрового фильтра с алгоритмом функционирования (5) не превышает порог значением  $\Pi = 0,8$ . Аналогично исследовано воздействие шума с  $\sigma_{ш} = 0,574$ . Превышений порогового значения  $\Pi = 0,8$  выходным сигналом цифрового фильтра с алгоритмом (5) также не зафиксировано. Слабый регулярный сигнал, также, как и слабое шумовое воздействие в отдельности не могут вызвать преодоления порога  $\Pi$  выходным сигналом цифрового фильтра. Исследования цифрового фильтра продолжены с аддитивной смесью (1a), в которой содержится сигнал (6) с амплитудой  $U_0 = 0,6$  и «белый» шум с  $\sigma_{ш} = 0,574$ . Результат моделирования показан на рис. 3.

Проанализировав содержание рис. 3а – 3б, можно сделать вывод о том, что пересечения порога  $\Pi$  происходят регулярно, т.е. при поступлении на вход цифрового фильтра положительной полуволны полезного сигнала. Если амплитуда сигнала остается неизменной, т.е.  $U_0 = 0,6$ , а  $\sigma_{ш}$  возрастает, то пересечения порога происходят регулярно, пока  $\sigma_{ш}$  не достигнет определенного критического значения.



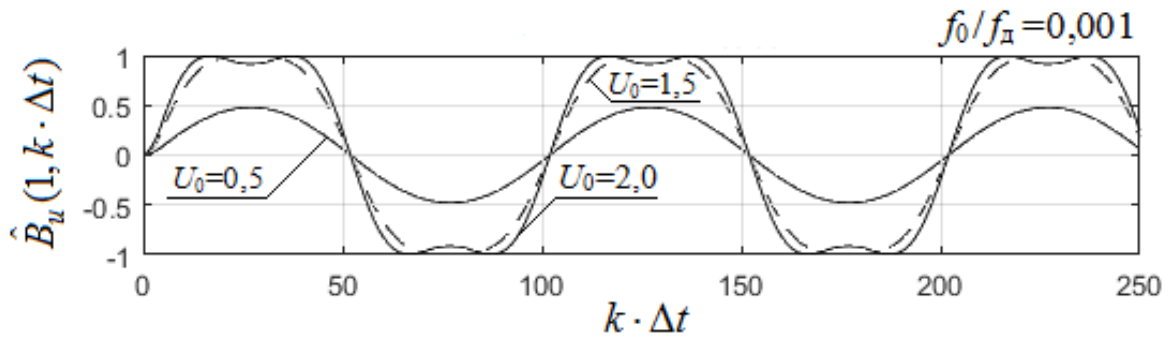


Рис. 1. Формы сигналов на выходе цифрового фильтра при поступлении на его вход централизованного периодического сигнала

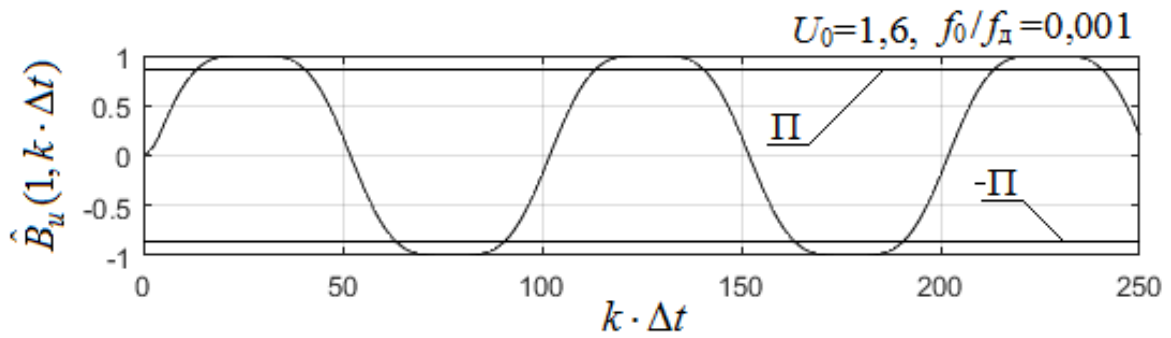
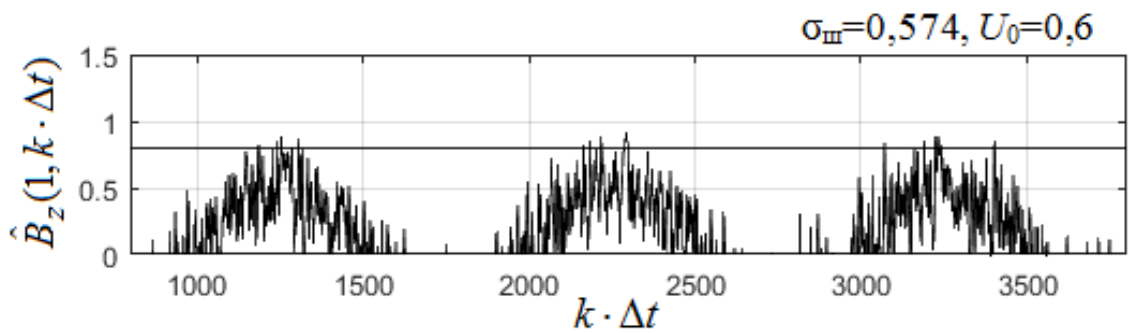
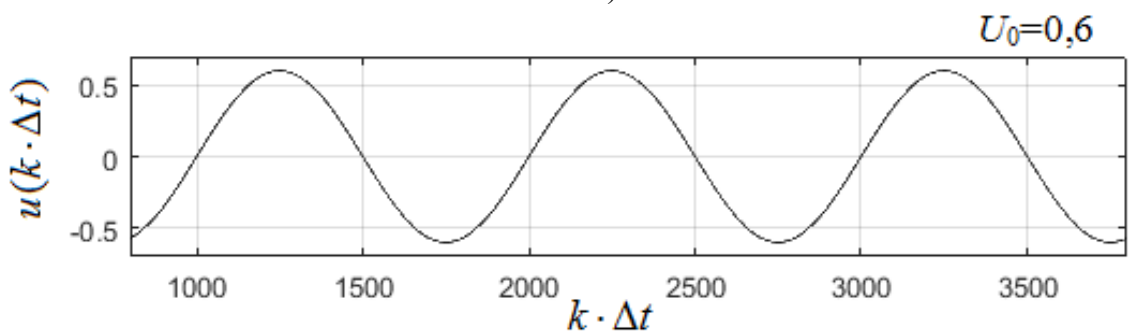


Рис. 2. Форма сигнала на выходе цифрового фильтра



а)



б)

Рис. 3. Формы сигналов

При достижении критического значения  $\sigma_{\text{ш}}$  пересечения порога  $\Pi$  наступают как во время воздействия положительной полуволны регулярного сигнала, так и во время воздействия его отрицательной полуволны. При дальнейшем увеличении  $\sigma_{\text{ш}}$  пересечения

порога становятся беспорядочными и уже не соответствуют приходу на вход положительной полуволны регулярного сигнала (рис. 4а – 4б). Таким образом, при больших значениях интенсивности шума происходит потеря явления стохастического резонанса в цифровом фильтре.

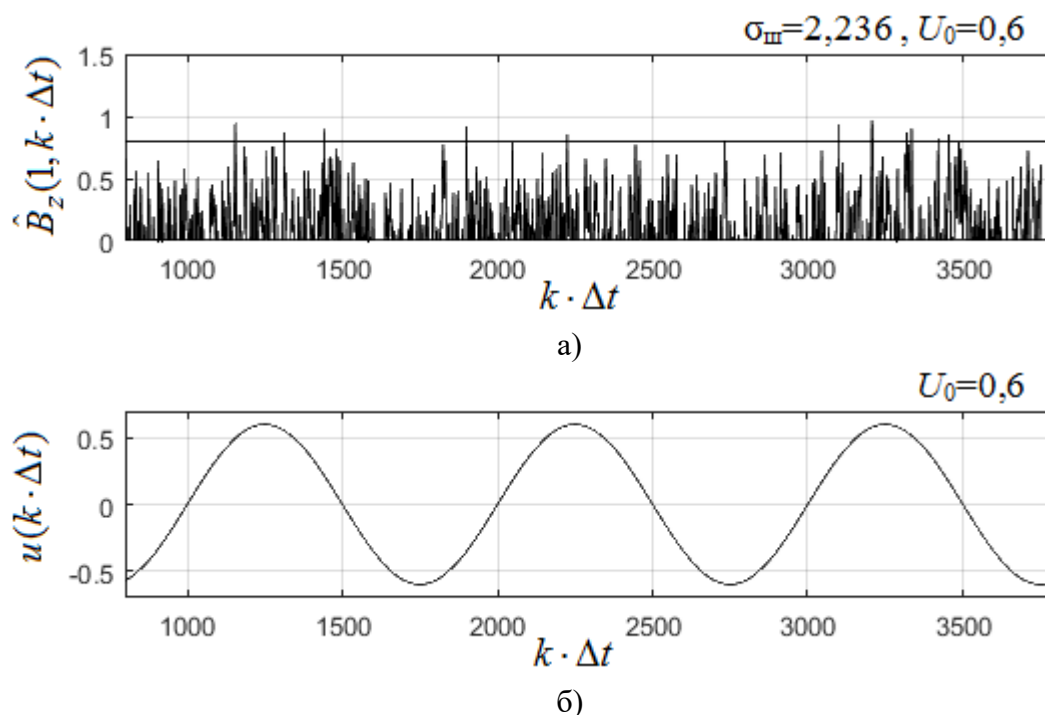


Рис. 4. Формы сигналов

#### IV. Заключение

1. Для значений амплитуды входного сигнала  $U_0 \geq 1$  форма выходного сигнала цифрового фильтра будет изменена по сравнению с формой входного сигнала. Например, при воздействии гармонического сигнала выходной сигнал устройства будет иметь форму, близкую к импульсной.

2. В цифровом фильтре с алгоритмом (5) наблюдается эффект стохастического резонанса. В частности, наблюдается преодоление выходным сигналом устройства заданного порога  $\Pi$ , при воздействии на него смеси полезного сигнала и шума. При этом порог не может быть преодолен при воздействии полезного сигнала или шума по отдельности.

3. Для цифрового фильтра с алгоритмом (5) существуют определенные значения соотношения сигнал/шум, при которых наблюдается возникновение эффекта стохастического резонанса.

4. Стохастический резонанс наступает при слабом сигнале, т.е. при малом отношении сигнал/шум на входе системы.

#### Библиографический список

1. Вешкурцев Ю. М., Вешкурцев Н. Д., Титов Д. А. Приборостроение на базе характеристической функции случайных процессов. Монография. Новосибирск, Изд. АНС «СибАК». 2018. 182 с.

2. Veshkurtsev Y. M., Veshkurtsev N. D., Titov D. A. Developing a Digital Filter Based on Characteristic and Trigonometric Functions // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2018. Vol. 1. Part 3. P. 132-136. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545907.

3. Titov D. A., Tabakova A. S., Yunkin I. V. Amplitude-Frequency Characteristic of the Device for Measuring Estimates of the Characteristic Function of Signal // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russian Federation, 2021, P. 1-7. DOI: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653698.

4. Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // Успехи физических наук. 1999. Том 169, № 1. С. 7–38.

5. Климонтович Ю.Л. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс? // Успехи физических наук. 1999. Том 169, № 1. С. 39–47.

*Дата поступления статьи: 12.03.23*

*Дата одобрения после рецензирования: 19.03.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. А. Титов, А. С. Табакова, 2023

УДК 537.867

*М. С. Федорова*

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА НА ЛОКАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

**Аннотация.** В статье предлагается неинвазивный метод исследования электрического импеданса на локальных участках тела человека с использованием векторного анализатора. На основании данных измерения коэффициента рассеяния были проведены исследования частотных зависимостей активной составляющей импеданса и модуля коэффициента рассеяния локальных участков тела человека. Выявлены изменения резонансной частоты и вида диаграммы Смита в зависимости от возраста человека. Установлено, что коэффициент рассеяния на высоких частотах не имеет отличительных особенностей от возраста человека. Представленные результаты показывают, что метод измерения электрического импеданса на локальных участках тела человека с помощью векторного анализатора позволяет получать информацию об их состоянии и может использоваться для исследования биологических процессов в организме человека.

**Ключевые слова:** электрический импеданс, неинвазивность, векторный анализатор, человек.

### I. Введение

Биоэлектрический импедансный анализ (БИА) – это неинвазивный метод характеристики тканей на основе электрического импеданса, используемый для получения информации о составе тела.

Электрическим импедансом (биоимпедансом) называется комплексное число, состоящее из активного сопротивления ( $R$ ) и реактивного сопротивления ( $X$ ) и вычисляется по формуле:

$$Z = R + jX, \quad (1)$$

где  $Z$  – импеданс,  $R$  – величина активного сопротивления,  $X$  – величина реактивного сопротивления,  $j$  – мнимая единица. Оба эти сопротивления измеряются специальными медицинскими приборами — биоимпедансными анализаторами состава тела.

Биоимпедансный метод позволяет производить анализ состава тела. Он охватывает широкий спектр компонент состава тела и оценок скорости метаболических процессов. Под компонентами (параметрами) состава тела подразумевают: тощую, или безжировую массу; активную клеточную массу; скелетно-мышечную массу; минеральную массу; общую, внеклеточную и внутриклеточную воду. Исторически первые факты применения метода оценки состава тела зарегистрированы в таких областях медицины, как диетология, профилактическая и спортивная медицина, реабилитология и эндокринология [1-4].

Целью работы является разработка методики измерения локального импеданса на теле человека с помощью NanoVNA.

## II. Методика эксперимента

Портативный векторный анализатор NanoVNA – векторный анализатор цепей для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), коэффициентов стоячей волны (КСВ), фазы, задержки и диаграммы Смита в диапазоне 50 кГц – 900 МГц (рис. 1). Прибор оборудован жидкокристаллическим дисплеем на тонкопленочных транзисторах (TFT ЖК) и обычно имеет встроенный литий-полимерный аккумулятор.

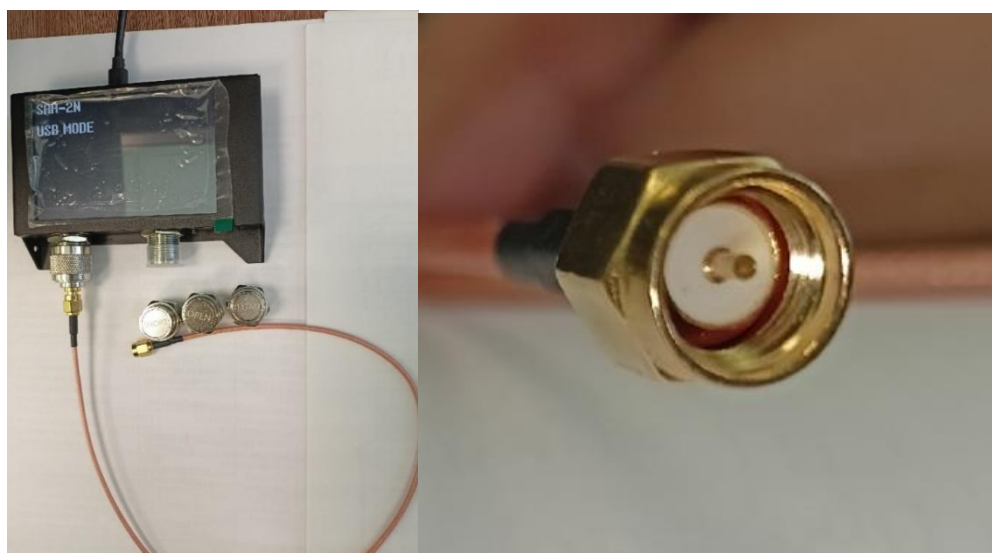


Рис. 1. Портативный векторный анализатор NanoVNA и калибровочные меры. Коаксиальный электрод

Базовые функции.

1. Установка диапазона сканируемых частот.
2. Калибровка.
3. Выбор формата графика и канала.
4. Измерение коэффициентов рассеяния, импеданса, модуля импеданса и диаграммы Смита.
5. Сохранение настроек в памяти и обработка результатов.

## III. Результаты и их обсуждение

Были проведены исследования, когда на указательный палец двух пациентов разных возрастных категорий мы прикладываем коаксиальный электрод портативного векторного анализатора NanoVNA, и третий результат был получен при отведении электрода в

открытый канал на воздухе. Были получены графики импеданса (рис. 2), модуля импеданса (рис. 3) и диаграммы Смита (рис. 4). Графики коэффициента рассеяния S11 от 50 кГц до 500 МГц уменьшаются, далее не изменялись.

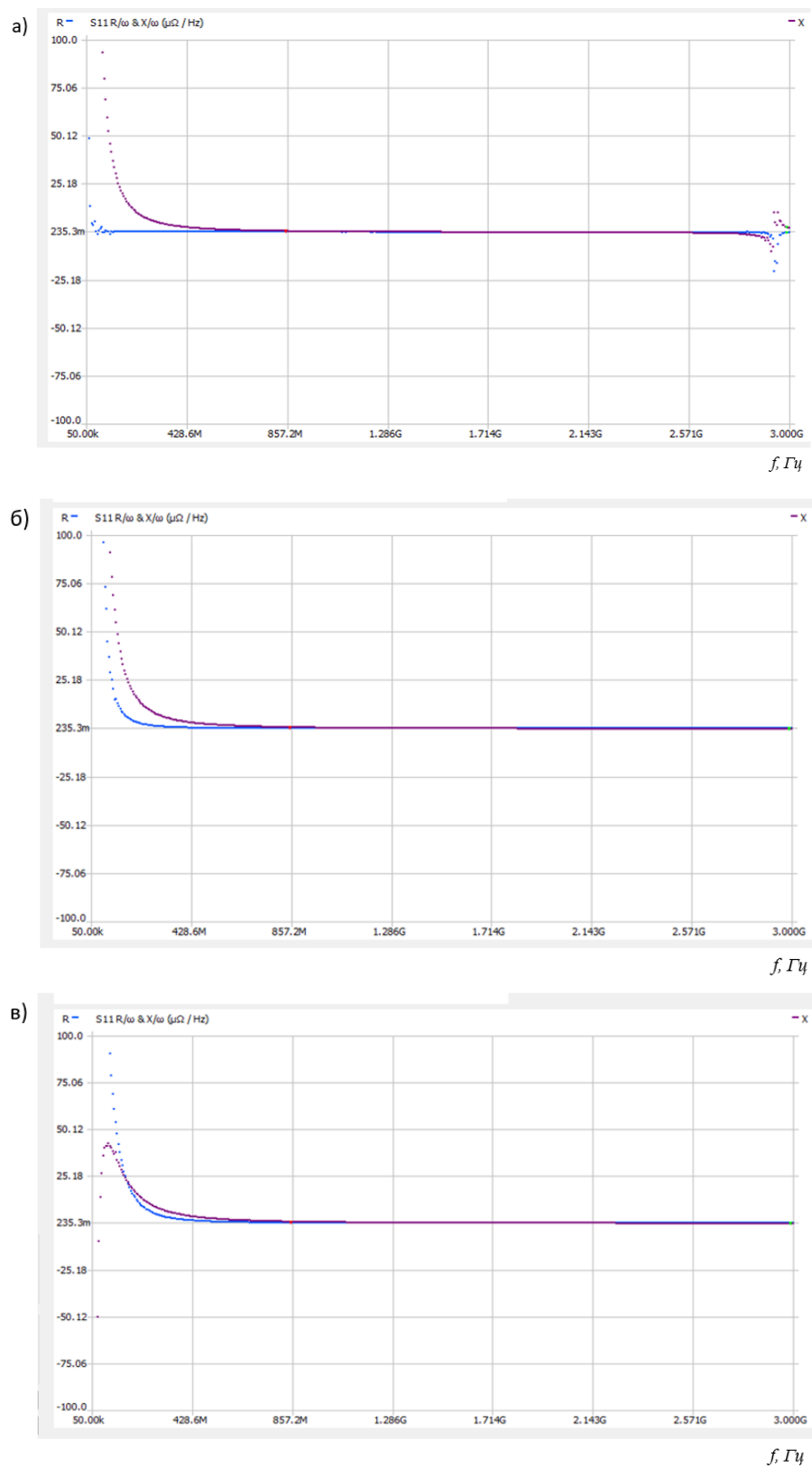


Рис. 2. Частотные зависимости активной составляющей импеданса: а) – открытый канал, б) – указательный палец пациента (67 лет), в) – указательный палец пациента (20 лет)

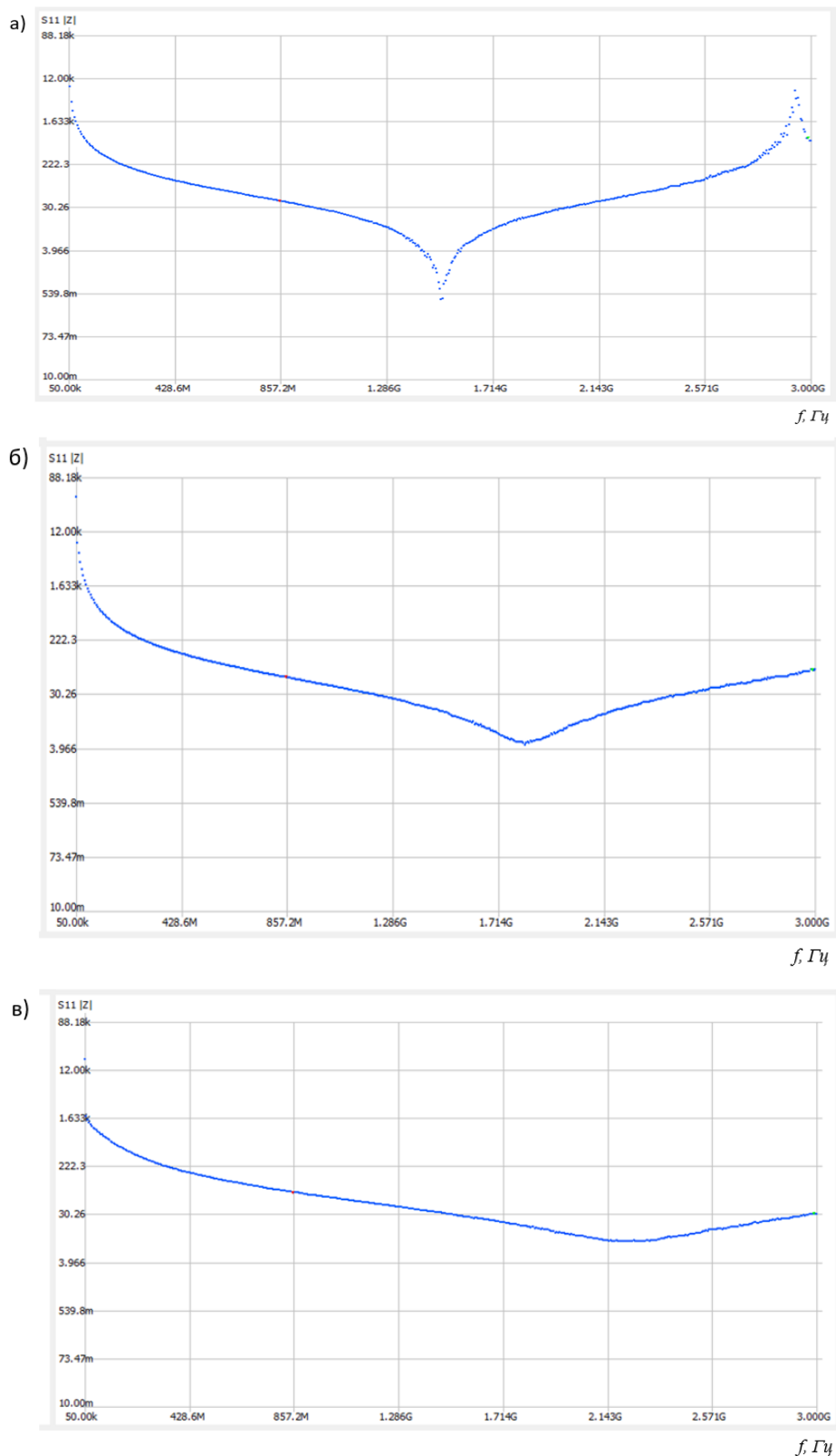


Рис. 3. Частотные зависимости модуля коэффициента рассеяния: а) – открытый канал, б) – указательный палец пациента (67 лет), указательный палец пациента (20 лет)

Разработанный метод позволяет выявлять различия в локальном импедансе пациентов в разной возрастной категории. Полученные измерения показывают, что наиболее чувствительным является модуль импеданса и его резонансная частота. Также следует

заметить, что характеристики ткани можно определить по виду диаграммы Смита в связи с ее различиями у пациентов.

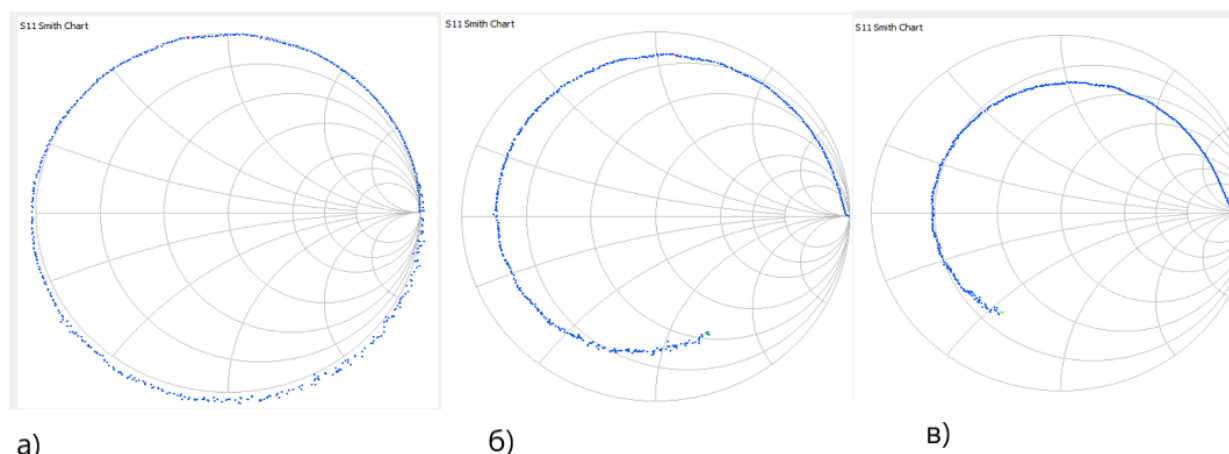


Рис. 4. Диаграммы Смита: а) – открытый канал, б) – указательный палец пациента (67 лет), в) – указательный палец пациента (20 лет)

## VI. Заключение

Предложен метод анализа электрического импеданса на локальных участках тела человека. На основе данного метода локально были проведены эксперименты с использованием векторного анализатора NanoVNA на указательных пальцах пациентов разных возрастных категорий (20 лет, 67 лет). Основными импедансными характеристиками, наиболее чувствительными к возрастным особенностям человека, являются модуль импеданса и его резонансная частота.

Научный руководитель: Козлов Александр Геннадьевич, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Scharfetter H., Schlager T., Stollberger R., Felsberger R., Hutten H., and Hinghofer-Szalkay H. Assessing abdominal fatness with local bioimpedance analysis: basics and experimental findings // *International Journal of Obesity*. 2001. Vol. 21. P. 502-511. DOI:10.1038/sj.ijo.0801556.
2. Cornish B. H., Jacobs A., Thomas B. J., and Ward L.C. Optimizing electrode sites for segmental bioimpedance measurements // *Physiological Measurement*. 1999. Vol. 20. P. 241-250. DOI:10.1088/0967-3334/20/3/302.
3. Leslie W. Organ, Gilbert B. Bradham, Dwight T. Gore, and Susan L. Lozier. Segmental bioelectrical impedance analysis: theory and application of a new technique // *Journal of Applied Physiology*. 1994. Vol. 77. P. 98-112. DOI:10.1152/jappl.1994.77.1.98.
4. Zhu F., Wystrychowski G., Kitzler T., Thijssen S., Kotanko P., Levin N. W. Application of Bioimpedance Techniques to Peritoneal Dialysis // *Contributions to Nephrology*. 2006. Vol. 150. P. 119-128. DOI:10.1159/000093511.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. С. Федорова, 2023

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ФОТО- И ВИДЕОКАМЕРЫ

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются принципы работы фото- и видеокамеры. Описывается основное устройство камер, а также процесс записи и хранения снимков и видео. Материал содержит сравнительный анализ основных типов фото- и видеокамер.

**Ключевые слова:** видеокамера, зеркальный фотоаппарат, беззеркальная камера.

### I. Введение

В современном мире фото- и видеокамеры являются неотъемлемой частью нашей жизни, они применяются в различных областях, таких как исследование, образование, искусство, коммерция и развлечения. Статья о принципах работы фото- и видеокамер является значимой, так как помогает понять, как работают эти устройства, какую роль играют сенсоры, объективы, процессоры и другие компоненты, что позволяет делать более осознанный выбор при их покупке и использовании. Понимание принципов работы фото- и видеокамер может помочь как профессионалам в этой области, так и обычным пользователям, желающим сделать высококачественные снимки и видеозаписи. Статья может также помочь студентам и ученым, занимающимся исследованием оптических и электронных систем, в том числе и в области развития новых технологий в области фото- и видеосъемки.

### II. Теория

Современные цифровые камеры можно разделить на две основные группы: зеркальные и беззеркальные. Обе эти категории имеют свои преимущества и недостатки. Схема принципа работы изображена на рис. 1.

Фотокамера работает по принципу преобразования света в электрический сигнал. Сперва, фотоны, попадающие в фотоаппарат от источника света, проходят через систему линз и отверстие объектива. Проходя через створки диафрагмы, которые регулируют необходимое количество проходящего внутрь света, отражается от зеркала и направляется в видоискатель. Для того, чтобы увидеть изображение в правильном положении, свет преломляется, проходя сквозь пентапризму. После того как происходит нажатие кнопки, зеркало поднимается и свет попадает на фоточувствительный элемент. Длительность этого действия зависит от створок, параметр которых называется – выдержка. Время экспозиции может достигать 1/4000 секунды. Элементы матрицы или сенсора преобразуют свет в электрический заряд. Перед тем, как мы получаем готовое изображение фотоны проходят фильтр Байера. Матрица имеет определенное количество пикселей, обычно от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов, что позволяет получать изображение высокого качества. Ячейки матрицы сохраняют информацию в цифровом виде, о том, сколько фотонов попало на матрицу, но при этом не сохраняет информацию о цвете, а только лишь о свете. Каждая ячейка накрывается специальным фильтром, содержащим базовые цвета (красным, синим или зеленым, которого в два раза больше). Поглощенные сенсором фотоны, испускают электроны. Каждый такой электрический заряд обладает интенсивностью, которую процессор переводит в последовательность единиц и нулей. Значение после экспозиции совмещаются специальным математическим алгоритмом. Попадая в процессор, по заданному алгоритму они формируют изображение.



Отличие беззеркальных камер небольшое. Беззеркальные камеры (mirrorless) не имеют зеркала, а вместо него используют электронный видоискатель или дисплей. Они более легкие и компактные, что делает их удобными для путешествий и повседневного использования [1].

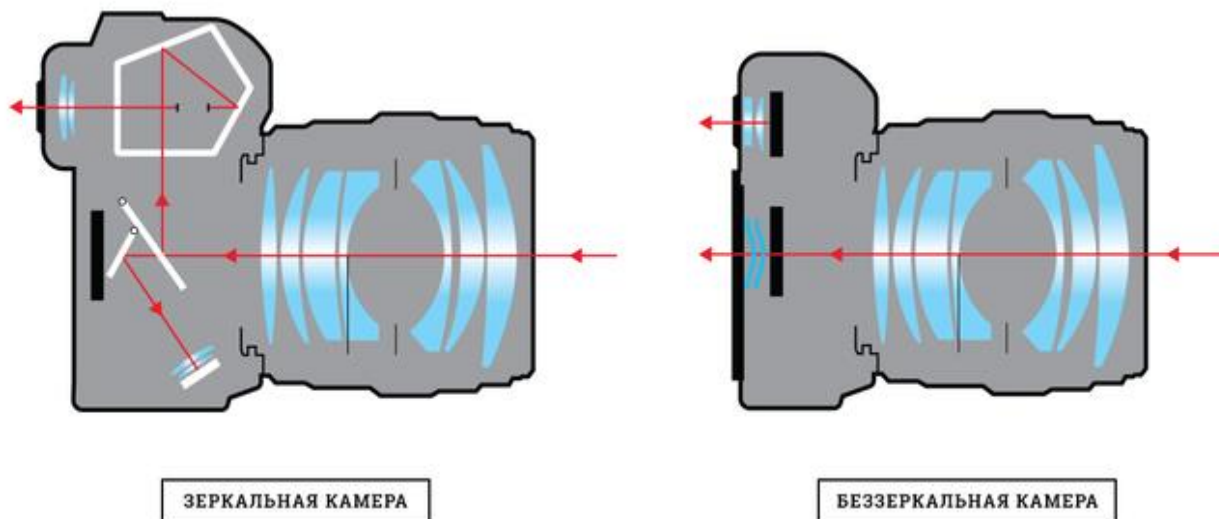


Рис. 1. Схема устройства и принципа работы фотоаппарата

Процесс получения качественного изображения состоит из нескольких этапов. Первым является правильное экспонирование картинка, затем оцифровка с помощью светочувствительного элемента, процессора фотокамеры и аналого-цифрового преобразователя.



Рис. 2. Треугольник экспозиции

Так называемый треугольник экспозиции, состоящий из: диафрагмы (f), выдержки (1/x) и ISO (50-25600) помогает добиться правильной экспозиции. Чем меньше значение диафрагмы, тем больше света попадает на матрицу, соответственно изображение будет с меньшей глубиной резкости и размытым фоном. Выдержка будет влиять на время открытие

створок, за которое на матрицу попадает свет, чем она быстрее, тем меньше изображение будет смазано. ISO – чувствительность или цифровая обработка, при большом значении которой, будет появление шумов. После правильно проэкспонированной картинке зафиксированное изображение обрабатывается процессором.

Процессор в видеокамере – это устройство, отвечающее за обработку данных, которые получаются при записи фото или видео. Он является сердцем девайса и позволяет реализовывать множество функций, таких как обработка изображения, подавление шума и стабилизация изображения.

Процессор внутри видеокамеры состоит из нескольких частей, каждая из которых отвечает за выполнение определенной функции. Одним из ключевых элементов процессора является центральный процессор (CPU). Он отвечает за выполнение основных задач, таких как управление записью видео, функцией автофокуса и контроль действием кнопок управления камеры.

Кроме того, процессоры видеокамер включают в себя различные виды дополнительных схем, таких как схемы обработки изображения, подавления шума и стабилизации изображения. Эти схемы помогают улучшить качество изображения, снизить уровень шума и обеспечить стабилизацию картинке.

Одной из главных функций процессора видеокамеры является обработка видео. Благодаря процессору, видеокамера может обрабатывать и сохранять видео в различных форматах и разрешениях. Это обеспечивает качественную запись и позволяет пользователю сохранять материал в нужном формате.

Однако, процессоры в видеокамерах имеют и свои ограничения. Во-первых, многие функции, которые реализует процессор, потребляют много энергии. Во-вторых, чем сложнее функции, тем больше мощности требуется от процессора. Таким образом, чтобы обеспечить высокое качество работы процессора, производители видеокамер должны устанавливать более мощные процессоры, что приводит к увеличению стоимости устройства.

Рассмотрим несколько форматов обработки изображений фото- и видеокамер, которые помогли повысить качество и надежность фото- и видеопроцессов.

1. Формат RAW – это непрерывный поток информации сенсора камеры без какой-либо обработки, который записывается на карту памяти. Формат RAW позволяет сохранить максимальное количество информации об изображении, такую как цвета, баланс белого, экспозиция и т.д. Эта информация даёт больше возможностей для редактирования в процессе последующей обработки. Для того, чтобы использовать RAW формат, необходимо наличие программного обеспечения, поддерживающего этот тип файлов.

2. Формат JPEG – это формат для хранения изображений, включающий алгоритм сжатия. Преимущество JPEG заключается в том, что он оптимизирует размер файла без значительной потери качества картинке. JPEG используется в основном для хранения и передачи фотографий в сети Интернет.

3. Формат AVI – это формат для хранения видеофайлов, помещаемые в контейнер. Этот формат был разработан корпорацией Microsoft в 1992 году. Видеофайлы в формате AVI могут включать аудио и видео потоки различных форматов, таких как VHS камеры, DV или MPEG. Файлы AVI могут быть проиграны на большинстве медиа-плееров.

4. Формат MP4 – это формат для хранения и передачи видеофайлов. Он был разработан группой MPEG (Moving Picture Experts Group) в 1998 году. Файлы MP4 обычно сжаты и содержат более высокое качество, чем файлы в формате AVI. В отличие от формата AVI, файлы MP4 могут также включать информацию о закладках, подписях и метках времени.

Форматы RAW и JPEG важны для работы с фотографиями, а форматы AVI и MP4 играют важную роль в хранении и передаче видеофайлов. Большинство современных фото-

и видеокамер поддерживают запись данных в эти форматы, что делает использование этих инструментов еще более востребованным и удобным [2].

### **III. Заключение**

В заключение можно сказать, что, помимо оптики, процессоры в видеокамерах играют важную роль в обеспечении высокого качества записи. Они обрабатывают видео, управляют функциями устройства и позволяют пользователю создавать материалы высокого качества. Однако, мощность процессора должна соответствовать функциям, которые необходимы пользователю. Результаты сравнительного анализа фото- и видеокамер показывают, что каждый тип имеет свои преимущества и недостатки в зависимости от ситуации и цели съемки.

Практические рекомендации включают в себя следующее.

1. Если вы хотите сделать высококачественные фотографии с отличной детализацией и контрастом, то лучше выбрать цифровую фотокамеру с большим датчиком изображения и качественным объективом.

2. Если вам нужно снять движущийся объект, то видеокамера более предпочтительна, так как она может записать более длительный сюжет и сохранить динамический эффект.

3. Если вы хотите снимать в условиях низкой освещенности, выберите фотокамеру с большой светочувствительностью (High ISO) или видеокамеру с высокой чувствительностью (Low Light).

4. Если вы снимаете в дороге или на открытом воздухе, то лучше выбрать компактную фотокамеру или экшн-камеру с меньшим размером и весом.

5. Если вы хотите создавать профессиональные видеозаписи, то лучше выбрать видеокамеру с возможностью записи в формате RAW или с использованием большого динамического диапазона (HDR).

6. Независимо от типа камеры, рекомендуется использовать штативы или стабилизаторы изображения для съемки стабильного и четкого кадра.

В целом, важно понимать, что выбор типа камеры зависит от вашей индивидуальной ситуации и нужд, и лучшее решение может быть различным для разных пользователей.

В статье проведен сравнительный анализ нескольких современных фото и видеокамер, а также форматов обработки изображений (RAW, JPEG, AVI, MP4). В результате даны рекомендации использования распространенных форматов для редактирования, передачи изображений или их хранения, возможности включать в них закладки и метки времени.

### **Библиографический список**

1. Prophotos.ru. Как устроен фотоаппарат и какие бывают фотоаппараты. URL: <https://prophotos.ru/lessons/16273-kak-ustroen-fotoapparat-kakie-byvayut-fotoapparaty> (дата обращения: 26.03.2023).

2. Цифровое видео. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5\\_%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D0%BE](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D0%BE) (дата обращения: 26.03.2023).

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 17.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. А. Флатун, А. И. Одинец, 2023

## МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИИ

**Аннотация.** В работе рассматривается микропроцессорное устройство динамической индикации. Изготовлен макет светодиодного куба размерами 8 x 8 x 8, основанного на динамической индикации, а также макет часов на газоразрядных индикаторах. Проведена сравнительная оценка схем индикации.

**Ключевые слова:** микропроцессорное устройство, динамическая индикация, статическая индикация, интегральная схема.

### I. Введение

Микропроцессорные устройства (МПУ) [1] применяются в вычислительных машинах различного типа. Они потребляют небольшую мощность, имеют компактные размеры. Рассмотрим виды микропроцессорных устройств динамической индикации и их структурные схемы, а также сферы применения технологии динамической индикации. Цель работы – разработка и практическое изготовление микропроцессорного устройства динамической индикации, а также исследование свойств различных устройств динамической индикации.

### II. Теория

Микропроцессорное устройство представляет собой функциональное и конструктивное изделие, которое выполняет следующие функции [1]:

- преобразование информации;
- получение информации;
- управление;
- обработка и передача информации.

Свойства микропроцессора:

- большая гибкость;
- перенастройка;
- необходимые изменения алгоритмов управления.

Широко используются два класса средств цифровой техники:

- устройства с жесткой структурой, выполненные на базе цифровых логических схем;
- электронные вычислительные машины (ЭВМ).

Устройства с жесткой структурой обычно содержат большое число интегральных схем (ИС) малой и средней степени интеграции. Эти схемы устанавливаются на платах, а их выводы соединяются в соответствии с реализуемыми функциями. Системы на основе ЭВМ могут легко перестраиваться с реализации одной функции на другую, для этого достаточно составить и занести в память новую программу. При использовании серийных ЭВМ это значительно сокращает сроки проектирования, изготовления и настройки системы [2]. Обобщенная структурная схема этой системы приведена на рис. 1.

Хочется также подчеркнуть, что различают три вида МПУ:

- секционные;
- однокристалльные;
- многокристалльные.

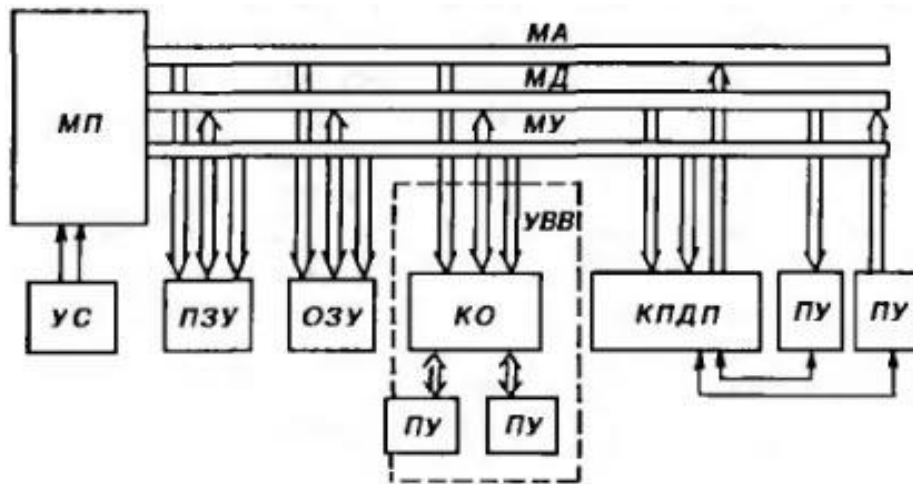


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорной системы

Секционные МПУ – это МПУ с микропрограммным управлением. Однокристалльные МПУ – это микропроцессоры с постоянно фиксированной разрядностью и системой команд. Микроконтроллеры – это однокристалльные микрокомпьютеры.

Самый простой вид индикации – это статическая индикация. Схема устройства статической индикации показана на рис. 2.

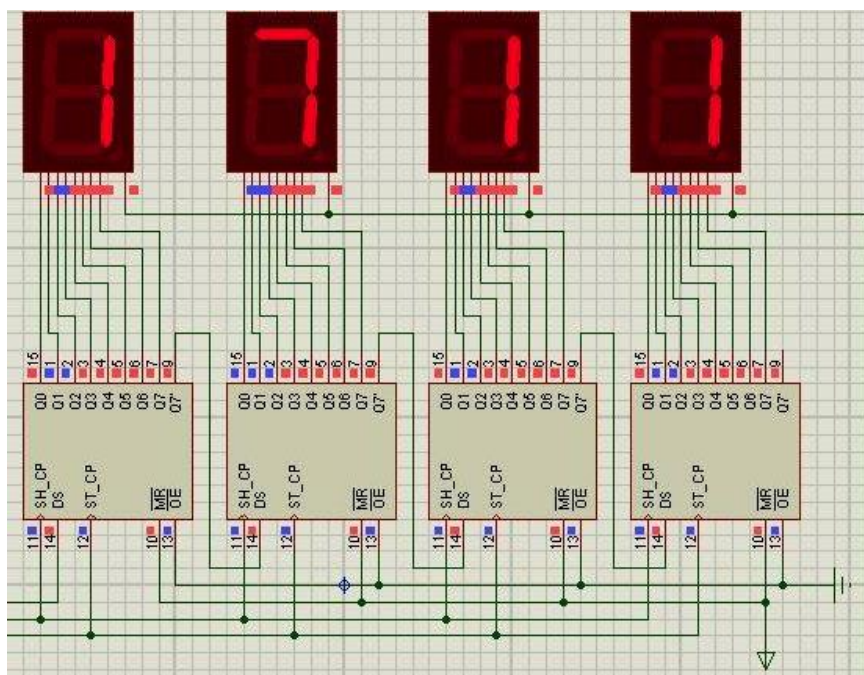


Рис. 2. Схема устройства статической индикации

При использовании статической индикации каждый сегмент будет существовать в одном из двух состояний – включен или выключен. Основное достоинство этой индикации состоит в том, что после вывода информации, состояние индикатора не изменится, пока не будут изменена информация в подключенных к нему регистрах. При присутствующем постоянном напряжении в сегментах индикатор будет максимально ярким.

Один из основных минусов состоит в том, что требуется большое число регистров (один разряд – одна микросхема). Чтобы упростить схему можно поставить драйверы mb15026, к которым не нужны резисторы и выходов для них больше (до 16-ти). Но тогда возрастает себестоимость изделия, так как драйверы стоят дорого. Еще одним из основных

минусов является то, что все сборки, в которых от 3 и более разрядов, идут с соединенными сегментами, и статически их использовать не получится.

Основная идея динамической индикации лежит в основе поочередного включения индикаторов. Подключение индикаторов необходимо производить в общей цепи преобразования с частотой от 120 до 140 Гц. Данной частоты будет достаточно, чтобы не замечать быстрого мерцания индикаторов на выходе. Если схема динамической цифровой индикации удалена от источника информации, то экономия преобразователей кода и соединительных проводов является достоинством динамической индикации.

Имея небольшие габаритные размеры и наименьшую стоимость продукта, схема с динамической индикацией потребляет ток гораздо меньше.

Семисегментные индикаторы получили распространение в цифровой электронике потому что изображение в них состоит из 7-ми сегментных светодиодов. Рассматривать динамическую индикацию можно как некий аналог развертки, применяемой в телевидении. Лишь один разряд индикатора отображает информацию в каждый момент времени, а остальные в этот момент погашены. Для демонстрации этого примера возьмем 7-ми сегментные индикаторы. Они собраны в четырехразрядный дисплей. На рис. 3 видна работа разрядов дисплея при динамической индикации. Красным цветом на рисунке показан разряд или снимок, который отображается.

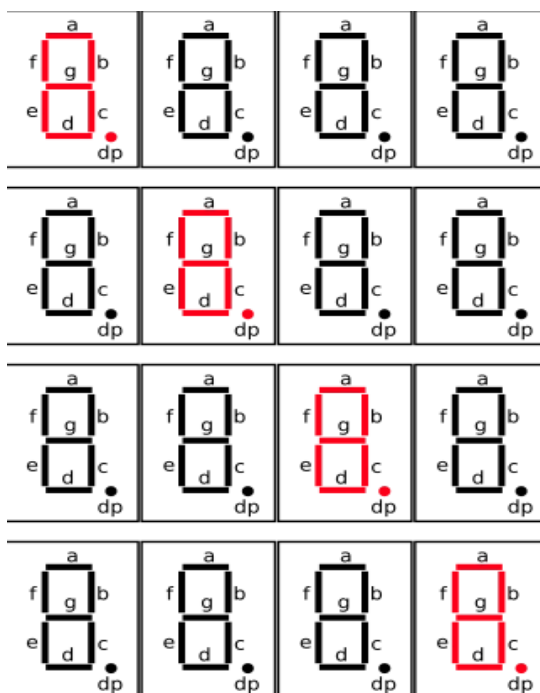


Рис. 3. Работа дисплея при динамической индикации

Исходя из физиологии человеческого зрения можно сделать вывод о том, что, если частота будет высока, то нами будет увиден объект таким, каким он отображался при статической индикации. Комфортная для зрения частота индикации должна превышать 50 Гц. Период индикации должен быть менее 20 мс.

Работа сдвигового регистра является основным способом получения динамической индикации. Сдвиговые регистры представляют собой последовательную цепочку триггеров. Сдвиг кода, записанного в эти триггеры, переписывается в следующий триггер, стоящий по порядку. С каждым тактом код, хранящийся в регистре, сдвигается на один старший разряд. Также он может сдвигаться в сторону младших разрядов. В общем случае используется сдвиг данных вправо и сдвиг данных влево. Сдвиг влево есть только у некоторых, реверсивных сдвиговых регистров. Структурная схема регистров сдвига приведена на рис. 4.



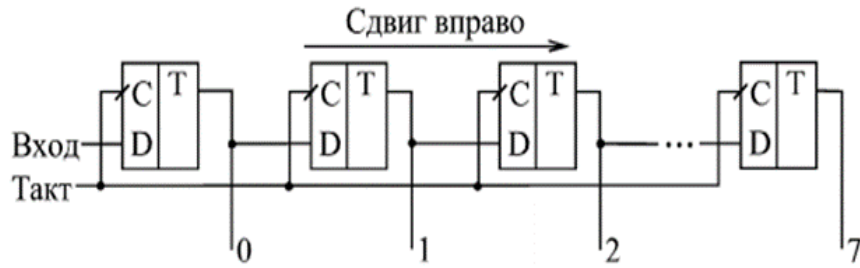


Рис. 4. Структурная схема сдвиговых регистров

Для выполнения исследований был разработан макет светодиодного куба с размерами 8 x 8 x 8 пиксель. Куб основан на динамической индикации. Он состоит из 512-ти светодиодов. Пример работы представлен на рис. 5.

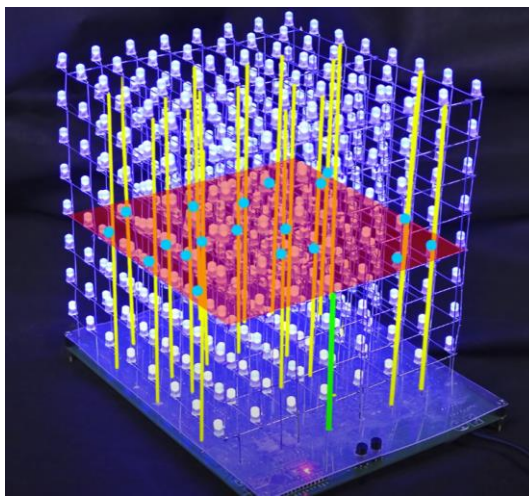


Рис. 5. Макет светодиодного куба

В макете использовался микроконтроллер Arduino Nano, сдвиговые регистры 74hc595n, максимальная частота 100 МГц, транзисторы TIP41С. Для выполнения исследований также были созданы часы на газоразрядных индикаторах ИН-12. В них также применяется технология динамической индикации, что существенно облегчает конструкцию изделия и его сборку. Внешний вид часов представлен на рис. 6.

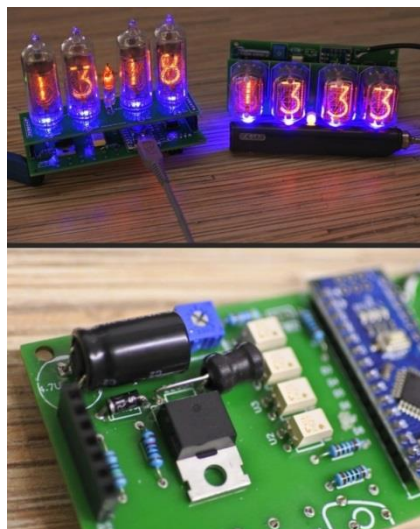


Рис. 6. Макет часов на газоразрядных индикаторах

Индикаторы включаются по очереди. За счет этого количество компонентов приводится к минимуму. Для реализации использовался микроконтроллер Arduino Nano.

### **III. Выводы и заключение**

Динамическая индикация позволяет сократить количество интегральных схемы и других комплектующих для реализации различных проектов. Также метод динамической индикации позволяет значительно снизить потребление энергии, ведь большую часть времени индикаторы находятся в выключенном положении. При большом количестве коммутируемых светодиодов целесообразно использовать схемы динамической индикации.

### **Библиографический список**

1. Бесекерский В. А., Ефимов Н. Б., Зиатдинов С. И. [и др.] Микропроцессорные системы автоматического управления. Ленинград: Машиностроение, 1988. 365 с.
2. Хайдаров К. Г. Теоретические основы электротехники и электроники. М.: Приор, 1999. 312 с.

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Чинчин В.В., Одинец А.И., 2023

УДК 681.5.075

*К. И. Шерстобитов, А. И. Одинец*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ»**

**Аннотация.** В данной работе реализована система управления «умный дом» на базе 8-битного микроконтроллера, с использованием различных датчиков и устройств вывода. Составлены и реализованы блоки управления освещенностью, климатом, безопасностью и блок дистанционного управления. Подобраны компоненты и построены схемы структурная и функциональная.

**Ключевые слова:** система управления, автоматизация, «умный дом», исполнительные элементы, микроконтроллер

### **I. Введение**

В настоящее время в мире всё больше набирают оборот системы «умного дома». Их история начинается с середины XX века, тогда данные системы на кнопках позволяли автоматизировать простые бытовые задачи, но особого распространения эти системы не получили. И только в 2012 году произошёл толчок, послуживший созданию таких систем, как SmartThings, Amazon Echo, Google Home и т.д. [1,2]. Эти системы позволяют пользователю контролировать своё жилище, управлять безопасностью, освещением, бытовыми приборами. В частных случаях система может решать определённые повседневные дела без участия человека в принципе. Это чрезвычайно гибкая система,



которую пользователь может настраивать в зависимости от своих потребностей. В данной работе предлагается система «умного дома» на платформе Arduino.

## II. Постановка задачи

В настоящее время существует множество готовых систем «умный дом», которые продаются вместе с датчиками и исполнительными механизмами.

В системе можно выделить конкретные три группы устройств.

- Контроллер (хаб) – центральное устройство, соединяющее датчики и актуаторы и производящее расчёты и проверки условий.
- Датчики – устройства, получающие информацию об условиях.
- Актуаторы – исполнительные устройства.

В большинстве современных устройств контроллер общается с остальными устройствами системы через радиосигналы на различных частотах, однако предлагаемое устройство будет иметь проводную коммутацию с датчиками и актуаторами. Беспроводная связь будет установлена между контроллером и пультом дистанционного управления с ИК-спектром.

## III. Теория

В качестве контроллера мы будем использовать цифровое устройство управления системой «умный дом» платформу Arduino UNO на базе 8-битного микроконтроллера ATmega328P (рис. 1).

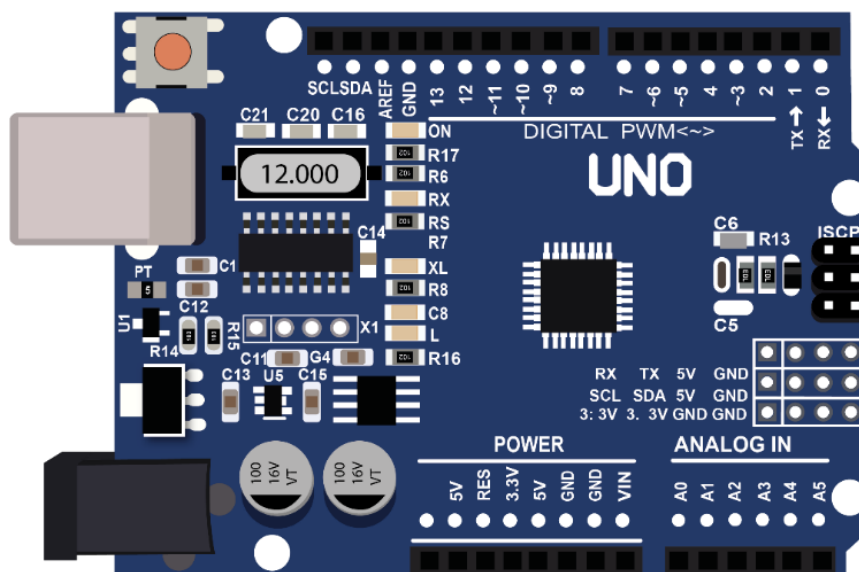


Рис. 1. Плата Arduino UNO

На плате мы имеем 13 цифровых выходов, 6 из которых поддерживают широтно-импульсную модуляцию, 6 аналоговых входов, а также выходы для питания.

В качестве периферии нам понадобятся различные датчики освещения, температуры, влажности, считыватель RFID (Radio Frequency IDentification) карточек, ИК-приёмник, исполнительные устройства – реле, сервомоторы.

Мы можем поставить перед собой следующие задачи:

- автоматическое управление освещением;
- система безопасности с использованием карт RFID;
- управление бытовыми приборами с пульта;
- поддержание микроклимата в комнате.

Для управления бытовой системой питания (например, для контроля освещения и бытовых приборов) нам понадобится блок реле. Для управления освещением нам понадобятся датчики, в первую очередь светочувствительные резисторы, так как если в комнате уже светло, то свет в ней включать не надо. В таких зонах, где человек задерживается ненадолго, например, в коридоре можно использовать пирозлектрический ИК-датчик, а для таких зон как кухня или жилая комната можно использовать объёмные датчики присутствия. Также мы реализуем управление микроклиматом комнат, используя комбинированный датчик температуры и влажности DHT-11. На один из каналов реле мы подключим увлажнитель воздуха, который будет переключаться в зависимости от показаний датчика. Также для удержания температуры в заданном диапазоне можно управлять включением вентилятора или кондиционера. Для реализации системы безопасности можно внедрить электромеханический замок, привязанный к считывателю RFID-карточек.

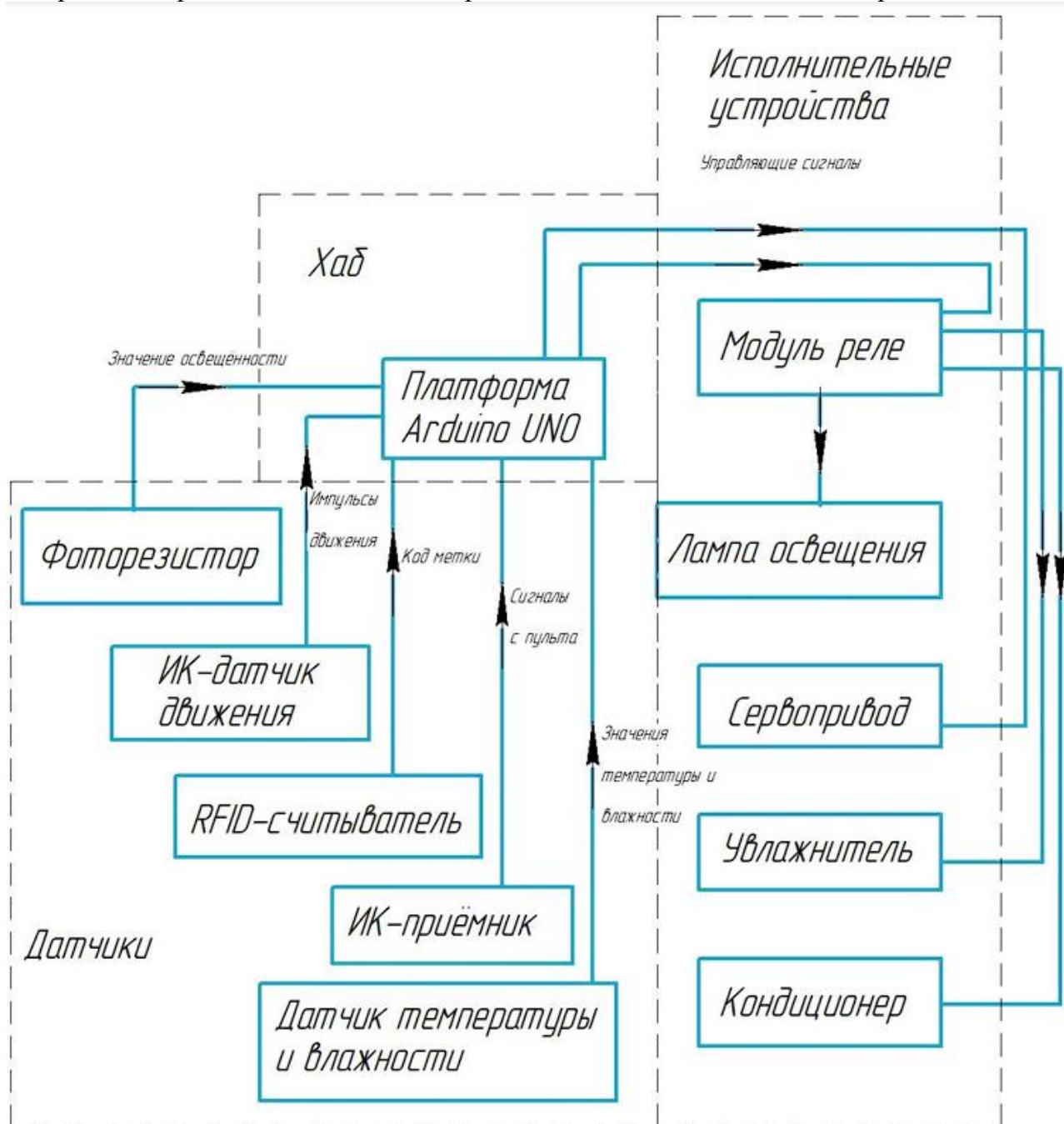


Рис. 2. Схема электрическая структурная системы управления

Для дистанционного управления системами «умного дома» будем использовать инфракрасный пульт дистанционного управления с модулем TSOP1736. На рис. 2 приведена схема электрическая структурная системы управления, а на рис. 3 – схема электрическая функциональная.

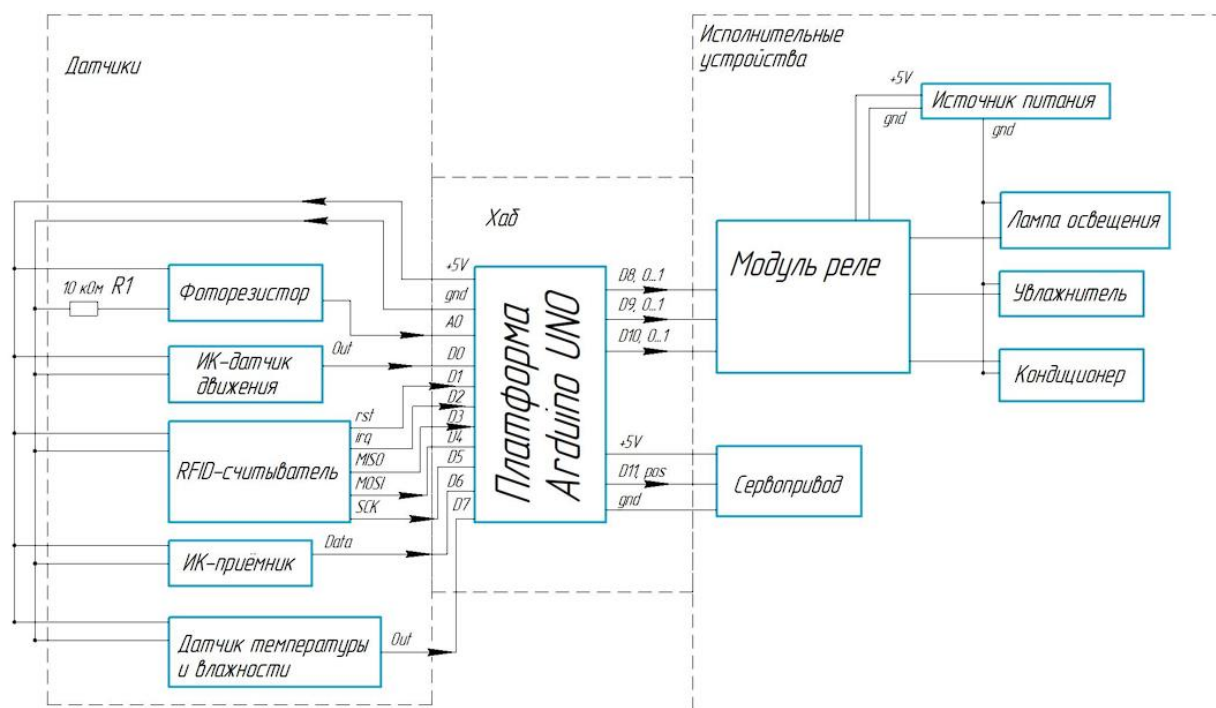


Рис. 3. Схема электрическая функциональная системы управления

#### IV. Выводы и заключение

Подводя итог, отметим простоту и актуальность представленных решений. По сравнению с производящимися на данный момент моделями «умных домов», разрабатываемая модель имеет преимущества в низкой стоимости компонентов, простоте написания кода и очень большой гибкости в выборе функционала. В качестве альтернативы проводному подключению можно использовать различные беспроводные интерфейсы, например, актуальный в наше время – ZigBee. Резюмируя проведённую работу, хотим отметить, что в работе была продемонстрирована лишь малая часть потенциала платформы Arduino в качестве цифрового устройства управления системой «умный дом».

#### Библиографический список

1. Петин В. А. Создание умного дома на базе Arduino: методическое пособие. ДМК Пресс, 2018. 180 с. ISBN: 978-5-97060-620-9.
2. Патюченко Ф. В., Слащев И. С., Клименко А. В., Трегубенко Л. А. Создание умного освещения на базе ардуино // Вестник науки. 2019. Т. 2, № 6(15). С. 408-410. EDN SFKVHG.

Дата поступления статьи: 29.03.2023

Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023

Дата принятия к публикации: 19.06.23

© К. И. Шерстобитов, А. И. Одинец, 2023

## РАЗРАБОТКА ВНУТРИЖЕЛУДОЧНОГО БОЛЮСА ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОСОБЕЙ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

**Аннотация.** В работе приведена информация об используемых системах идентификации особей крупного рогатого скота, как в мировой, так и в отечественной практике. Обосновано применение внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации. Выполнен анализ производителей внутрижелудочных болюсов и выявлено отсутствие отечественных. Предложена конструкция отечественного болюса, приведена структурная и электрическая схемы и общий вид изготовленного действующего прототипа.

**Ключевые слова:** радиочастотная идентификация, крупный рогатый скот, молочное хозяйство, внутрижелудочный болюс, система сбора данных.

### I. Введение

Идентификация особей крупного рогатого скота (КРС) имеет большое значение для управления работой молочных хозяйств, в контексте развития современного сельского хозяйства. В настоящее время, повышаются требования к контролю качества выходной продукции молочных хозяйств, а, следовательно, к здоровью и благополучию особей КРС. Использование идентификации организует управление большим количеством особей КРС, обеспечивает их мониторинг от рождения до убоя, отслеживает распространение болезней, и позволяет вести учет их транспортировки.

В настоящее время для идентификации особей КРС в мировой и отечественной практике широко применяется технология RFID (англ. Radio Frequency IDentification, радиочастотная идентификация), использующая радиоволны для идентификации объектов. В большинстве стран, такой способ идентификации животных вынесен на государственный уровень и закреплен в законодательстве [1]. Сводная информация о мировом опыте использования систем радиочастотной идентификации КРС в молочных хозяйствах, приведена в таблице 1.

Таблица 1

**Мировой опыт использования систем радиочастотной идентификации КРС в молочных хозяйствах**

Страна	Практическая реализация					Требование законодательства в части использования
	Бирка на ухо	Бирка кольцевого типа	Ошейник	Мини-ампула	Болюс	
Австралия	+	+	+	+	+	Обязательно
Аргентина	+			+		
Бразилия		+	+	+		
Великобритания	+	+			+	
Канада			+	+	+	
Россия	+	+				Рассматривается
Евросоюз	+				+	Обязательно
США	+	+	+		+	Добровольно
Южная Корея	+	+		+		Обязательно
Япония	+		+	+		

Такой способ идентификации позволяет автоматизировать процесс идентификации и выполнять его, не причиняя беспокойства животным, поскольку нет необходимости в прямом контакте. Используемые RFID-метки могут быть реализованы в виде бирки на ухо, бирки кольцевого типа, ошейника, мини-ампулы и внутрижелудочного болюса.

Однако, в зависимости от практической реализации RFID-меток, имеются следующие недостатки. Бирки (на ухо и кольцевого типа) легко подменить, также они могут выпасть в ходе социального взаимодействия особей. Ошейник является достаточно дорогостоящим оборудованием и, кроме того, причиняет особям КРС определенные неудобства. Мини-ампула для своей установки, требует специального оборудования, и после убоя животного, не подлежит повторному использованию. Внутрижелудочный болюс лишен приведенных недостатков, поскольку он устанавливается внутрь желудка особи КРС, способен функционировать от внутреннего источника питания в течение 4 лет, не причиняет дискомфорта, пригоден к повторному использованию после забоя животного. И, как отмечают многие исследователи, внутрижелудочный болюс, является перспективным направлением в части цифровизации молочного хозяйства [2].

## **II. Постановка задачи**

Анализ товаров, представленных на агропромышленных выставках, ассортимента торговых площадок, результатов патентного поиска за последние 5 лет показал, что рынок внутрижелудочных болюсов для особей КРС, представлен исключительно зарубежными производителями. Что в контексте экономических и геополитических событий в нашей стране и в мире, является ограничивающим фактором к их использованию. В такой ситуации, целесообразным является разработка внутрижелудочного болюса, являющегося аналогом или превосходящим по техническим, экономическим и эксплуатационным характеристикам зарубежные образцы.

Внутрижелудочные болюсы зарубежных производителей, используемые для радиочастотной идентификации особей КРС, являются RFID-метками (транспондерами), считывание информации с которых осуществляется посредством считывающих устройств (интеррогаторов). При этом используется стандартная конструкция RFID-метки, т.е. интегральная схема для хранения и обработки информации, модулирования и демодулирования радиочастотного сигнала и антенна для приёма и передачи сигнала. По типу источника питания, используемые RFID-метки активные, дальность действия средняя (до 5 м). Выполненный анализ внутрижелудочного болюса, с точки зрения радиотехнической системы, позволил выявить его технические и конструктивные особенности и сформировать порядок разработки отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации особей КРС [1].

## **III. Разработка внутрижелудочного болюса**

В конструкции разрабатываемого отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС, можно выделить следующие основные компоненты:

- а) внутрижелудочный болюс с RFID-меткой активного типа, состоящей из полупроводникового чипа и антенны и работающей по принципу транспондера;
- б) считыватель, состоящий из антенны, радиочастотного электронного модуля и электронного модуля управления;
- в) контроллер, состоящий из базы данных (БД) и программного обеспечения (ПО), управляющего процессами считывания уникального идентификатора RFID-метки и сравнения его с записями, хранящимися в БД.

Функционирование отечественного внутрижелудочного болюса осуществляется следующим образом. Внутрижелудочный болюс, находящийся в желудке особи КРС, имеет RFID-метку, т.е. уникальный идентификационный номер в системе [3]. Считыватель,

который находится в руках оператора или закреплен на неподвижном объекте, распространяет сигналы электромагнитных волн для идентификации объектов. Передача информации и энергии осуществляется без какого-либо контакта между RFID-считывателем и RFID-метками. Метки, попавшие в радиочастотное поле считывателя, получают из этой области необходимую энергию ЭМ-волн для связи. Когда метка получает необходимую энергию, несущий сигнал модулируется в соответствии с сохраненной информацией. Модулированный несущий сигнал отправляется от метки к считывателю. Структурная схема отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС представлена на рис. 1.

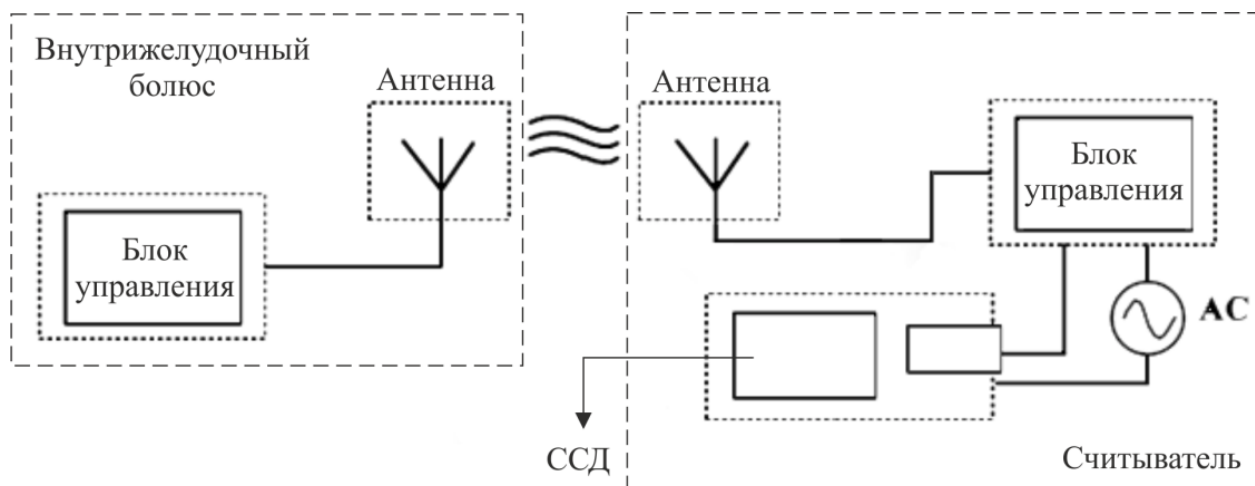


Рис. 1. Структурная схема отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС

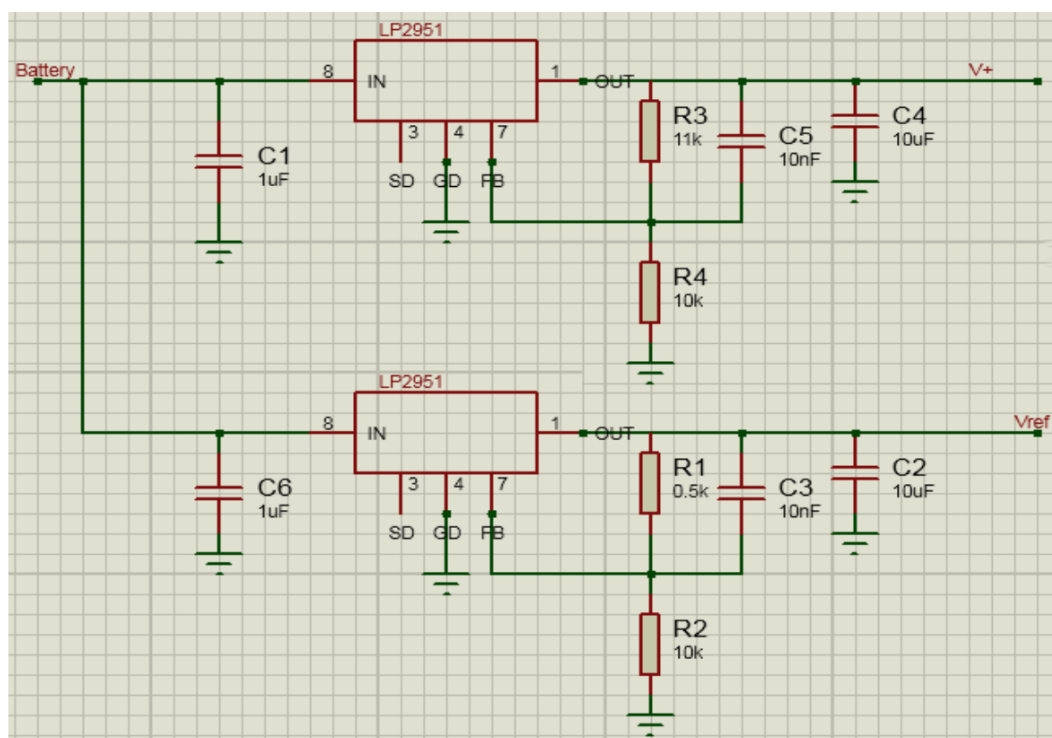


Рис. 2. Электрическая схема отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС

Считыватель обнаруживает модулированный сигнал, расшифровывает его код и считывает его. Полученная информация передается в систему сбора данных (ССД). Метка RFID представляет собой портативный или мобильный модуль, который при помещении в поле действия считывателя, отправляет данные считывателю [1, 3]. Электрическая схема отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС представлена на рис. 2.

Конструктивно разработанный отечественный внутрижелудочный болюс представляет собой пластиковый цилиндр размером 29 x 150 мм и массой 140 г. Форма болюса является обтекаемой для исключения причинения дискомфорта особи КРС. В нижней части болюс утяжелён, для того что бы сохранить вертикальное расположение в желудке [4]. Антенна болюса – четвертьволновая несимметричная. Общий вид действующего прототипа отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС представлен на рис. 3.



Рис. 3 Общий вид отечественного внутрижелудочного болюса для радиочастотной идентификации КРС (действующий прототип)

Внутрижелудочный болюс содержит источник питания, обеспечивающий расчетное функционирование на протяжении 4 лет при использовании для идентификации не более 15 раз в сутки [2, 5]. После забоя особи КРС внутрижелудочный болюс может быть использован повторно, для этого следует обновить базу данных и соотнести уникальный номер болюса с новой особью КРС.

## VI. Заключение

В работе приведена статистика по использованию методов и технических средств идентификации особей КРС в молочном хозяйстве, отмечено, что, в настоящее время актуальной мировой практикой, является использование внутрижелудочного болюса. В ходе исследования, выделены ключевые особенности внутрижелудочных болюсов зарубежных производителей, описан порядок разработки отечественного болюса. Приведены структурная, электрическая схемы и показан общий вид разработанного действующего прототипа.

Научный руководитель: Людмила Альбертовна Денисова, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Шлома Д. Н. Разработка системы сбора данных для экспериментальных исследований цифровизации молочно-мясного скотоводства // Информационные технологии и автоматизация управления: материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, работников образования и промышленности. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 295–305. EDN GOECOW
2. Rahman A., Smith D. V., Little B., Ingham A. B., Greenwood P. L., Bishop-Hurley G. J. Cattle behaviour classification from collar halter, and ear tag sensors. Inf. Process. Agric. 2018. Vol. 5. Issue 1. P. 124-133. DOI:10.1016/j.inpa.2017.10.001.

3. Robert B., White B. J., Renter D. G., Larson R. L. Evaluation of three-dimensional accelerometers to monitor and classify behavior patterns in cattle. *Comput. Electron. Agric.* 2009. Vol. 67, № 1-2. P. 80–84.

4. Han S., Pool J., Tran J., Dally W. J. Learning both weights and connections for efficient neural networks. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2015. P. 1135–1143.

5. Han S., Mao H., Dally W. J. Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and Huffman coding. *arXiv* 2015. DOI:10.48550/arXiv.1510.00149.

*Дата поступления статьи: 04.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. Н. Шлома, 2023



*Секция*  
**Информационная безопасность**

*Под редакцией А. Ю. Никифоровой*

УДК 004.056

*Д. Е. Абдурахманова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ПО УПРАВЛЕНИЮ УЯЗВИМОСТЯМИ НА 2023 ГОД**

**Аннотация.** В статье проводится анализ состояния организаций по управлению уязвимостями к 2023 году. Рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются организации, факторы, способствующие увеличению количества уязвимостей, основные тенденции и рекомендации по эффективному управлению уязвимостями для построения результативной защиты.

**Ключевые слова:** уязвимость, управление уязвимостями, vulnerability management кибербезопасность, информационная безопасность, VM-системы, программы раскрытия уязвимостей, bug bounty.

**I. Введение**

Управление уязвимостями (англ. «vulnerability management») — это один из основных аспектов кибербезопасности, который включает выявление, оценку и устранение уязвимостей в ИТ-инфраструктуре организации.

В данной статье будет проведен анализ текущего состояния организаций, практикующих vulnerability management, с целью выявления проблем, с которыми сталкиваются компании, и определения рекомендаций по эффективному управлению уязвимостями.



Рис. 1. Количество зарегистрированных уязвимостей в NVD за 2018-2022 гг.

Так, за последние несколько лет заметна тенденция значительного роста количества сообщений об уязвимостях. Согласно Национальной базе данных уязвимостей (NVD), в 2022 году было зарегистрировано 30 327 уязвимостей, что на 20% больше, чем в предыдущем году (см. рис. 1). Ожидается, что эта тенденция сохранится, поскольку использование новых технологий и растущее число устройств, подключенных к Интернету, продолжают создавать новые проблемы безопасности.

## **II. Факторы роста количества уязвимостей**

Одним из ключевых факторов роста числа уязвимостей является растущее использование программного обеспечения с открытым исходным кодом. Хотя одним из достоинств данного типа программного обеспечения является его гибкость и экономичность, оно также может создавать риски для безопасности. Согласно отчету Synopsys, 99% коммерческих кодовых баз содержат компоненты с открытым исходным кодом, большая часть из которых имеют известные уязвимости [1].

Еще одним фактором является нехватка квалифицированных специалистов по информационной безопасности. Согласно отчету (ISC), во всем мире не хватает 3,4 миллиона специалистов по информационной безопасности [2]. Этот дефицит мешает организациям справляться с растущим объемом уязвимостей и должным образом управлять ими: выявлять и определять их приоритет, а также реализовывать эффективные стратегии смягчения последствий.

Кроме того, пандемия COVID-19 создала новые проблемы для управления уязвимостями [3,4]. С переходом на удаленную работу и ростом онлайн-активности организациям пришлось быстро адаптироваться к новым технологиям и рискам безопасности. Например, использование личных устройств и незащищенных домашних сетей.

Еще одной проблемой является отсутствие полной информации о системах и активах организации. По мере того, как организации расширяют ИТ-инфраструктуры, возможно упущение из виду некоторых систем, что затрудняет выявление уязвимостей. Это отсутствие видимости может сделать организации уязвимыми для кибератак на системы и активы, о которых они могут не знать.

Необходимость постоянного мониторинга также является одной из проблем для некоторых организаций в процессе управления. Поскольку уязвимости могут возникнуть в любое время, и организациям важно своевременно выявлять и реагировать на проблему безопасности. Для этого требуется непрерывный мониторинг систем и активов, который может быть сложным и трудоемким для реализации.

Таким образом, управление уязвимостями является критическим аспектом кибербезопасности, который становится все более сложным из-за растущего числа уязвимостей, нехватки квалифицированных специалистов по информационной безопасности. Для эффективного управления организации необходимо знать о тенденциях в управлении уязвимостями.

## **III. Тенденции в управлении уязвимостями**

Vulnerability management постоянно развивается, чтобы идти в ногу с новыми технологиями и новыми угрозами. Одной из основных тенденций данного направления является все более широкое использование автоматизации и машинного обучения. Эти инструменты могут помочь организациям повысить скорость и точность обнаружения и устранения уязвимостей. Например, "решение MaxPatrol VM, в основе которого лежит уникальная технология управления активами Security Asset Management (SAM). Благодаря ей MaxPatrol VM собирает данные в активном и пассивном режимах, идентифицирует активы по множеству параметров и на их основе строит актуальную модель ИТ-инфраструктуры. В

MaxPatrol VM разделены сбор информации об активах и определение уязвимостей. Решение запоминает результаты предыдущих сканирований активов и на основе этого автоматически высчитывает применимость новой уязвимости к узлам сети" [5].

Облачные решения для управления уязвимостями также набирают популярность. Согласно отчету MarketsandMarkets, ожидается, что мировой рынок облачных услуг безопасности увеличится с 40,8 млрд долларов в 2022 году до 77,5 млрд долларов к 2026 году [6]. Облачные решения для управления уязвимостями позволяют организациям выявлять и устранять уязвимости в облачных средах и предоставлять видимость и контроль над ИТ-инфраструктурой. По результатам опроса Positive Technologies российские компании менее заинтересованы в развертывании VM-систем в облаках (16%). Однако уход западных вендоров, повлекший дефицит железа, вынуждает российский рынок ускорить переход на общемировой тренд – эффективное использование ресурсов, облачных технологий, контейнерных сред. Так, по данным исследования Positive Technologies "организации постепенно переводят в контейнеры 1-2-3% своей инфраструктуры. Компании покупают и внедряют решения для частных облаков" [7,8]. В то же время применение новых технологий приводит к новым уязвимостям, о которых не стоит забывать.

Относительно российского рынка наблюдается активное использование такого подхода по управлению уязвимостями, как программы раскрытия информации об уязвимостях (Coordinated vulnerability disclosure - CVD), участие организаций в bug bounty, которая предназначена для привлечения множества внештатных исследователей для поиска уязвимостей в программном обеспечении, веб-приложениях и ИТ-инфраструктуре. Это позволяет компаниям провести тестирование информационных активов под разными углами, выявить и устранить уязвимости до того, как злоумышленники смогут обнаружить проблему и использовать в своей деятельности. Например, платформа The Standoff 365, которая была запущена в мае 2022 года. На текущий момент на платформе насчитывается более 1500 зарегистрированных белых хакеров, которые помогают выявлять уязвимости в продуктах, и около 7 компаний, принявших участие на платформе и в совокупности опубликовавших 47 программ. По данным исследования AllTheResearch прогнозируется рост рынка bug bounty до 5,4 млрд долларов к 2027 году. Тенденция имеет перспективы развития – согласно отчета платформы HackerOne количество программ увеличилось на 34% в сравнении с 2020 годом, а выявленных уязвимостей на 21% больше [9, 10, 11].

#### **IV. Основные практики в управлении уязвимостями**

Одним из распространённых способов vulnerability management является регулярное сканирование и оценка. Этот процесс включает в себя использование автоматизированных инструментов для сканирования ИТ-инфраструктуры организации на наличие уязвимостей, а затем оценку серьезности для определения уровня критичности. Данный подход позволяет организациям выявлять уязвимости до того, как они могут быть использованы злоумышленниками, и гарантировать установку последних обновлений систем и приложений.

Согласно данным исследования Positive Technologies в четвертом квартале 2022 года более половины организаций столкнулись с утечкой данных из-за неисправленной уязвимости [12]. Эта статистика подчеркивает важность проведения регулярного сканирования и оценки уязвимостей, чтобы обеспечить их своевременное выявление и устранение.

Еще одной практикой в управлении является взаимодействие ИТ- и ИБ-подразделения. Для эффективной работы ИБ-специалистам необходимо грамотно выстроить взаимодействие с ИТ-отделом. Согласно опросу, проведенному Positive Technologies, "27% респондентов используют проактивный подход в устранении уязвимостей: ИТ-подразделение регулярно устанавливает патчи или обновления ОС и ПО, не дожидаясь информации об

уязвимостях от службы ИБ. Чем крупнее компании, тем выше среди них процент применяющих данный подход. 28% применяют реактивный подход: ИТ-подразделение устанавливает патчи или обновления ОС и ПО после того, как служба ИБ предоставит информацию об обнаруженных уязвимостях и сформирует списки активов, ОС и ПО для реагирования" [7].

Автоматизация устранения уязвимостей — один передовых методов, который может помочь организациям сэкономить время и повысить точность усилий по управлению уязвимостями. Данный подход включает использование автоматизированных инструментов для применения исправлений безопасности к уязвимым системам и приложениям.

Создание программ управления уязвимостями также является одной из практик. Программа управления уязвимостями — это комплексный план, в котором описываются процессы, политики и процедуры управления уязвимостями в организации. Он должен включать регулярное сканирование и оценку, установление приоритетов на основе рисков, автоматическое устранение проблем, а также непрерывный мониторинг и отчетность.

Согласно данным исследования Tripwire, в 2022 году 71% организаций имеют официальную программу управления уязвимостями [13]. Эта статистика подчеркивает, что все больше организаций внедряют программу управления уязвимостями в качестве одного из подходов по управлению уязвимостями.

Наконец, регулярное обучение сотрудников. Сотрудники могут быть слабым звеном в системе безопасности организации, и важно убедиться, что они осведомлены о рисках и способах их снижения. Регулярное обучение позволяет сотрудникам распознать потенциальные уязвимости и сообщить о них соответствующему персоналу.

Согласно отчету IBM, средняя стоимость утечки данных в 2022 году составила 4,4 миллиона долларов по сравнению с 4,2 миллиона долларов в 2021 году и 3,9 миллиона долларов в 2020 году [14]. Одной из причины является человеческий фактор, что подчеркивает важность регулярного обучения сотрудников.

Своевременное обновление также является один из эффективных подходов управления уязвимостями. Согласно отчета Verizon о расследовании утечек данных за 2021 год, более 60% утечек были связаны с уязвимостями, для которых были доступны исправления, но они не применялись. Поэтому для организаций крайне важно уделять приоритетное внимание установке обновлений, чтобы снизить риск успешной кибератаки.

В целом методы управления уязвимостями включают непрерывный мониторинг и оценку, своевременную установку обновлений, а также четкие политики и процедуры. Следуя этим рекомендациям, узнавая о новых угрозах и технологиях, организации могут повысить общую безопасность и снизить риск успешной кибератаки.

## **V. Заключение**

Управление уязвимостями продолжает оставаться критически важным процессом для организаций в 2023 году. Текущее состояние показывает, что хоть многие организации внедрили некоторые передовые методы, еще есть возможности для улучшения. Регулярное сканирование и оценка, применение проактивного и реактивного подходов, создание программ управления уязвимостями, а также регулярное обучение сотрудников — все это ключевые передовые методы, которые организации должны учитывать для повышения уровня безопасности своей инфраструктуры. Поскольку кибератаки становятся все более изощренными и частыми, для организаций крайне важно быть в курсе новых угроз и технологий, продолжать улучшать процессы управления уязвимостями для предотвращения потенциальных кибератак.

Научный руководитель: Соловьев Вадим Анатольевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

10. DevSecOps Practices and Open Source Management in 2020. URL: <https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/sig-assets/reports/open-source-security-risks-in-the-2020s.pdf> (дата обращения: 30.03.2023).
11. (ISC)<sup>2</sup> 2022 Cybersecurity Workforce Study. URL: <https://www.isc2.org/-/media/ISC2/Research/2022-WorkForce-Study/ISC2-Cybersecurity-Workforce-Study.ashx> (дата обращения: 30.03.2023).
12. Situational Awareness: Cyber Threats Heightened by COVID-19 and How to Protect Against Them. URL: <https://www.crowdstrike.com/blog/covid-19-cyber-threats/> (дата обращения: 24.03.2023).
13. The Next Great Disruption Is Hybrid Work — Are We Ready? URL: <https://www.microsoft.com/en-us/worklab/work-trend-index/hybrid-work> (дата обращения: 22.03.2023).
14. MaxPatrol VM. Система нового поколения для управления уязвимостями. URL: [https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/products/mpvm/MaxPatrol-VM\\_PB-09-2022.pdf](https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/products/mpvm/MaxPatrol-VM_PB-09-2022.pdf) (дата обращения: 22.03.2023).
15. Cloud Security Market by Security Type, Application (Visibility and Risk Assessment, User and Data Governance), Service Model, Organization Size, Vertical (BFSI, IT and ITeS, Retail) and Region (2022 - 2026) URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/cloud-security-market-100018098.html> (дата обращения: 24.03.2023).
16. Как изменилась работа с уязвимостями в 2022 году. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/kak-izmenilas-rabota-s-uyazvimostyami-v-2022-godu/#id11> (дата обращения: 24.03.2023).
17. Кибербезопасность 2022-2023. Тренды и прогнозы. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ogo-kakaya-ib/> (дата обращения: 24.03.2023).
18. Платформы bug bounty: исследование мирового рынка. URL: <https://standoff365.com/articles/bug-bounty-platform-analytics-2022#9> (дата обращения: 24.03.2023).
19. Hacker-Powered Security Report: Industry Insights '21. URL: <https://www.hackerone.com/hacker-powered-security-report-2021> (дата обращения: 24.03.2023).
20. Bug Bounty Market By End User (IT Firms, Telecommunication, Government Institutes, and Others), and By Region (North America, Europe, Asia Pacific, Latin America, MEA), - Global Forecasts 2017 to 2027. URL: <https://www.alltheresearch.com/report/437/bug-bounty-market> (дата обращения: 24.03.2023).
21. Актуальные киберугрозы: III квартал 2022 года. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q3/> (дата обращения: 24.03.2023).
22. Insight into The 2022 Vulnerability Management Report. URL: <https://www.tripwire.com/state-of-security/insight-vulnerability-management-report#:~:text=Even%20though%2071%25%20of%20organizations,prioritization%20in%20the%20IT%20environment> (дата обращения: 24.03.2023).
23. Cost of a Data Breach Report 2022. URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/3R8N1DZJ> (дата обращения: 24.03.2023).

*Дата поступления статьи: 31.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. Е. Абдурахманова, 2023

## **АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НА ПРЕДМЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ**

**Аннотация:** В настоящий момент обеспечение информационной безопасности для компаний различных видов деятельности играет важную роль. Данное направление стало наиболее актуальным с применением методов социальной инженерии, а также инструментов OSINT. В статье рассмотрено несколько способов применения данных инструментов для определения уязвимостей информационной сети организации для повышения уровня защищенности предприятия.

**Ключевые слова:** социальная инженерия, инструменты OSINT, сбор информации, открытые источники.

### **I. Введение**

Широкое применение и стремительное развитие сетевых технологий приводят к образованию ряда определенных специфических проблем в сфере информационной безопасности. В настоящее время актуальной проблемой является необходимость сохранения эффективной защиты информации, которая приводит к росту правонарушений, связанных с неправомерным доступом к защищаемой информации, принадлежащей сети предприятий.

Нарушители применяют методы социальной инженерии для исследования инфраструктуры организации. Человеческий фактор по-прежнему остается самым уязвимым звеном в любой системе защиты. Исходя из этого возрастает потребность в обучении сотрудников организаций основам информационной безопасности.

Социальная инженерия является самым популярным методом атак на физических лиц и вторым по популярности в атаках на организации. В 2022 году было зафиксировано 93% атак на физических лиц и 43% атак на организации. Такие атаки были направлены на использование человеческого фактора [1].

Нарушители используют разного рода способы воздействия. Следует отметить, что атаки с использованием методов социальной инженерии могут привести к различным последствиям, таким как: кража конфиденциальных данных, установка вредоносного программного обеспечения, что может привести к крупным финансовым потерям. Распространенным методом социальной инженерии в атаках на организации являются сообщения электронной почты. Например, с помощью фишинговых рассылок злоумышленники могут получить учетные данные пользователей и проникнуть в корпоративные сети организации.

### **II. Теоретические основы социального инжиниринга**

Социальная инженерия (в контексте информационной безопасности) - это совокупность психологических и социологических приёмов, методов и технологий, используемых с целью совершения определенных действий для получения конфиденциальной информации [2]. Социальная инженерия направлена на человеческий фактор, который обусловлен невнимательностью, наивностью, легкомыслием.

Объектом воздействия в социальной инженерии являются пользователи информационных систем. Особый интерес обретают те пользователи, которые обладают значимой информацией, как правило, это сотрудники предприятий [3]. Методы социальной

инженерии применяют для выполнения различных операций, взлома, кражи сведений (например, персональные данные клиентов) и другого несанкционированного доступа к информации. Социальная инженерия является мощным средством, которое может нанести колоссальный ущерб компании.

Злоумышленники не оставляют без внимания мониторинг социальных сетей сотрудников организаций. Реализуется возможность для проведения анализа информации страниц пользователей, сообществ и многого другого. Для сбора информации существуют различные методы. Атака на личный профиль в социальных сетях может быть достаточно эффективной. Например, можно установить вредоносную программу на устройство сотрудника, с которого по прошествии некоторого времени он подключается к внутренней сети организации, а также использует корпоративную почту. Пользователи, с низким уровнем компетенций в области информационной безопасности, могут размещать в профиле социальных сетей рабочие вопросы, пересылать документы, содержащие конфиденциальные данные, которые представляют высокую ценность для нарушителя. Распространенной ошибкой сотрудников является установка одинаковых паролей для доступа к личным страницам социальных сетей и рабочей почте, корпоративной сети. В данном случае злоумышленнику предоставляются данные, что упрощает выбор и разработку атаки на инфраструктуру предприятия.

### **III. Разведка по открытым источникам (open source intelligence, OSINT)**

Рассмотрим один из значимых методов социальной инженерии, направленный на сбор информации из открытых источников. Open source intelligence, OSINT — это сбор с последующим анализом данных, полученных из различных источников, для реализации определенных стратегических и тактических решений с целью повышения конкурентоспособности организаций, которые проводятся в рамках закона и с соблюдением этических норм [4]. Разведка среди доступных источников, охватывающая любую информацию, в том числе данные, которые могут быть получены на законных основаниях из публичных источников.

Проведение информационно-аналитической работы в любой сфере деятельности включает в себя полноценный процесс формирования данных для проведения анализа собранной информации из всех доступных открытых источников.

Работа с полученными данными заключается во владении навыками обработки, систематизации и проведении анализа информации для достижения основных целей и задач.

Инструменты OSINT не являются вредоносными программами или программами взлома, а напротив являются вспомогательным дополнением к поиску информации в открытых источниках. Так же инструменты OSINT используют в целях конкурентной разведки и с целью поиска уязвимостей собственной компании, например, для поиска внутренних нарушителей.

OSINT применяется практически во всех областях деятельности и наиболее характерен для:

- получения разведывательных данных, как правоохранительными органами, так и злоумышленниками;
- оценки защищённости объектов;
- расследования инцидентов информационной безопасности;
- анализа наиболее актуальных угроз безопасности;
- получения конкурентных преимуществ, путём сбора информации о своих потенциальных клиентах и продуктах конкурирующих организаций.

### **IV. Апробирование инструментов OSINT**

С целью апробирования инструментов OSINT для обнаружения уязвимостей

внутренней сети предприятия были рассмотрены и продемонстрированы результаты поиска информации, на примере организации АО «Высокие технологии» были обнаружены уязвимости серверов.

В первую очередь необходимо узнать IP адрес исследуемого предприятия. С использованием инструмента OSINT «<https://2ip.ru/whois/>» [5] и указанием названия домена организации, это становится возможным. Предоставляются данные, которые необходимы для дальнейшего поиска информации.


IP сайта:	185.26.122.20
Страна:	 Россия
Владелец:	Visokie Tehnologii, JSC
Информация о домене:	Регистрация 2014-09-19 03:04:51
	Истекает 2023-09-19 04:04:51
Веб-сервер:	nginx

Рис. 1. Поисковая система «2ip.ru»

Затем по IP адресу организации можно применить эффективный инструмент OSINT - Shodan.io [6].

С помощью поискового инструмента Shodan можно определить по IP адресу все рабочие порты маршрутизатора, а также подключенные к нему устройства. Злоумышленник может обнаружить незащищенные порты, что позволит подключиться к сети организации и получить доступ к файлам, содержащим конфиденциальные данные.

Применение данного инструмента OSINT способствует обнаружению некоторых уязвимостей и угроз информационной безопасности.

При указании IP адреса организации данный сервис предоставляет следующую информацию:

Частью OSINT является анализ данных и поиск способов их использования. Информация, представленная здесь, является хорошей основой для построения атаки с использованием социальной инженерии.

При обеспечении эффективной безопасности информационной сети предприятия, необходимо знать уязвимости используемого сервера.

Уязвимость веб-сервера Nginx связана с логической ошибкой в реализации TLS при работе с разными протоколами, но с использованием совместимых сертификатов, таких как многодоменные или подстановочные сертификаты. Эксплуатация уязвимости может позволить нарушителю, который подключается удаленно, перенаправить трафик с одного поддомена на другой, что приведет к созданию действительного сеанса TLS.



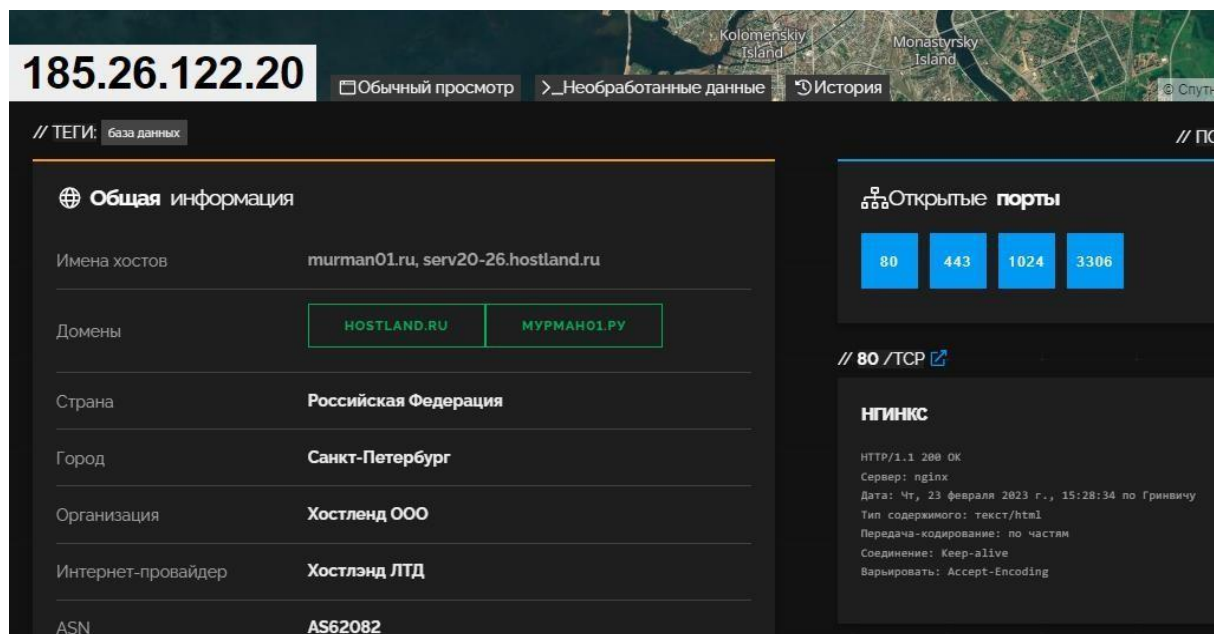


Рис.2. Поисковая система «Shodan»

Также при анализе IP адреса в поисковой системе Shodan удалось выявить следующие уязвимости:

Таблица 1

**Уязвимости организации**

<b>CVE-2018-20685</b>	В OpenSSH 7.9 scp.c в клиенте scp позволяет удаленным SSH-серверам обходить предполагаемые ограничения доступа через имя файла или пустое имя файла. Влияние заключается в изменении разрешений целевого каталога на стороне клиента.
<b>CVE-2017-15906</b>	Функция process_open в sftp-server.c в OpenSSH до версии 7.6 неправильно предотвращает операции записи в режиме только для чтения, что позволяет злоумышленникам создавать файлы нулевой длины.
<b>CVE-2020-14145</b>	Клиентская сторона в OpenSSH 5.7–8.4 имеет наблюдаемое несоответствие, ведущее к утечке информации при согласовании алгоритма. Это позволяет злоумышленникам-посредникам нацеливаться на первоначальные попытки подключения.
<b>CVE-2019-6110</b>	В OpenSSH 7.9 из-за приема и отображения произвольного вывода stderr с сервера злонамеренный сервер (или злоумышленник «Человек посередине») может манипулировать выводом клиента, например, использовать управляющие коды ANSI для сокрытия дополнительных передаваемых файлов.
<b>CVE-2019-6111</b>	Проблема была обнаружена в OpenSSH 7.9. Из-за реализации scp сервер выбирает какие файлы/каталоги отправляются клиенту. Клиент scp выполняет только поверхностную проверку возвращаемого имени объекта (предотвращаются только атаки обхода каталога). Вредоносный сервер scp (или злоумышленник «Человек посередине») может перезаписать произвольные файлы в целевом каталоге клиента scp. Если выполняется рекурсивная операция (-r), сервер также может манипулировать подкаталогами (например, перезаписывать файл .ssh/authorized_keys).

## **V. Заключение**

На основе вышеприведенного анализа можно сделать вывод о том, что с применением инструментов OSINT организация может проводить сбор данных с последующим анализом, а также выявлять внутренние уязвимости, устранение которых повысит уровень информационной безопасности организации.

В результате апробирования инструментов OSINT, без использования программ взлома или труднодоступных, платных баз данных, возможно получить всю необходимую информацию о внутренней сети организации, а также определить серверы и их уязвимости.

Для пользователей информационной системы организации необходимо всегда быть внимательным, следует проверять информацию об отправителе, прежде чем перейти по ссылке или скачать предлагаемый файл. Полученные файлы перед открытием необходимо проверять с помощью антивирусного программного обеспечения. Специализированное антивирусное ПО позволяет обнаружить вредоносные ссылки и файлы в корпоративной электронной почте до момента их открытия. Так же необходимо удостовериться в том, что домен легитимный и истинный.

Существует несколько технологий, которые позволяют повысить уровень защищенности от фишинговых атак. Настроенная SPF-запись определяет почтовые серверы и домены, которым разрешено отправлять письма на почту от имени домена. В качестве дополнительной меры защиты необходимо проверять PTR-запись для определения имени узла- адресата по его IP-адресу, а также наличие IP-адреса отправителя в спам-базах [7].

При реализации организационных мер необходимо разработать и внедрить программы повышения компетентностей сотрудников в области информационной безопасности, проводить обучение сотрудников. Минимальными мерами для эффективной реализации повышения уровня компетенций необходимо направить на практическую часть обеспечения безопасности, а также в должностной инструкции каждого сотрудника прописать обязанности и ответственность за обеспечение информационной безопасности.

## **Библиографический список**

1. Актуальные киберугрозы: II квартал 2022 года. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q2/> (дата обращения: 27.02.2023).
2. Грей Дж. Социальная инженерия и этичный хакинг на практике // пер. с англ. В.С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2023. 226 с.
3. Хэднеги К. Искусство обмана. Социальная инженерия в мошеннических системах. // пер. с англ. А. Соломина. – М.: ДМК Пресс, 2020. 410 с.
4. OSINT/Encyclopedia by Kaspersky – URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/osint/> (дата обращения: 15.02.2023).
5. Поисковая система: 2ip.ru. URL: <https://2ip.ru/whois/> (дата обращения: 20.02.2023).
6. Поисковая система: Shodan. URL: <https://www.shodan.io> (дата обращения: 20.02.2023).
7. Как социальная инженерия открывает хакеру двери в вашу организацию. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/social-engineering/> (дата обращения: 20.02.2023).

*Дата поступления статьи: 28.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Т.А. Алексенко, 2023

## **ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ШЛЮЗОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ СЕТЕВЫХ УГРОЗ (UTM/NGFW-РЕШЕНИЙ)**

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема импортозамещения UTM/NGFW-решений. Рассказывается про определение UTM/NGFW, обосновывается необходимость импортозамещения, сравниваются отечественные и зарубежные продукты. Объясняется, как лучше подойти к выбору отечественного UTM/NGFW-решения и на что стоит обратить внимание.

**Ключевые слова:** UTM/NGFW-решение, импортозамещение, информационная безопасность.

### **I. Введение**

В настоящее время для все большего числа компаний комплексное обеспечение информационной безопасности является одной из наиболее приоритетных задач. Желание организовать максимальный уровень защиты при наименьшем количестве денежных вложений привело к появлению UTM/NGFW-решений – шлюзов для комплексной защиты от сетевых угроз, «которые могут содержать в себе большое число функций: межсетевой экран, антиспам, антивирус, обнаружение вторжений, контентную фильтрацию и др.» [1].

Современный рынок информационной безопасности включает в себя немало таких продуктов: как отечественных, так и зарубежных. Благодаря чему до недавнего времени компании могли позволить себе выбирать подходящие UTM/NGFW-решения на основе множества показателей (объем базы решающих правил для средства обнаружения и (или) предотвращения вторжений (далее – СОВ, СПВ), обеспечение отказоустойчивости, авторитет производителя и т. д.). Но после ухода многих зарубежных вендоров с российского рынка тема импортозамещения стала как никогда актуальна, в том числе и для данного вида технологий.

### **II. Необходимость импортозамещения UTM/NGFW-решений**

В связи с изменениями, происходящими в настоящее время на рынке программного обеспечения и оборудования сегодня многие UTM/NGFW-решения начали подвергаться все большему риску, тем самым значительно снижая уровень информационной безопасности компаний, в которых они функционируют. Отсутствие технической поддержки, обновлений безопасности (в том числе баз решающих правил) и другие факторы напрямую влияют на степень отказоустойчивости, а также противодействия сетевым атакам. Ситуацию также усугубляет и то, что само по себе UTM/NGFW-решение, чаще всего, предполагает его установку в достаточно критичном сегменте – на «границе» сети – для максимального охвата защищаемой сетевой структуры, а также для того, чтобы оно являлось первой преградой на пути осуществления сетевой атаки потенциальным злоумышленником.

На основании данных компании АО «Позитив Текнолоджиз» количество атак в 2022 году значительно увеличилось по сравнению с 2021 годом (рис. 1), а из сводной статистики методов атак за 4 квартал 2022 (рис. 2) года можно сделать вывод, что UTM/NGFW-решение может в полной мере выступать в качестве противодействия как минимум одному методу атаки («Эксплуатация уязвимостей»), но только при осуществлении технической поддержки производителем.

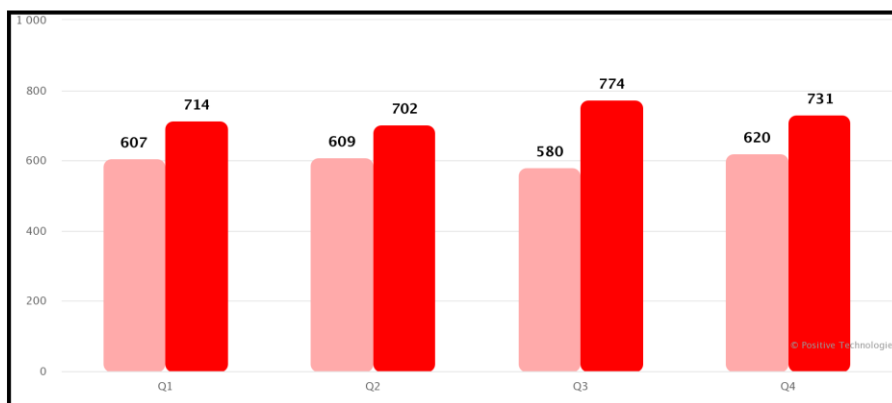


Рис. 1. «Количество атак в 2021 и 2022 годах (по кварталам)» [2]

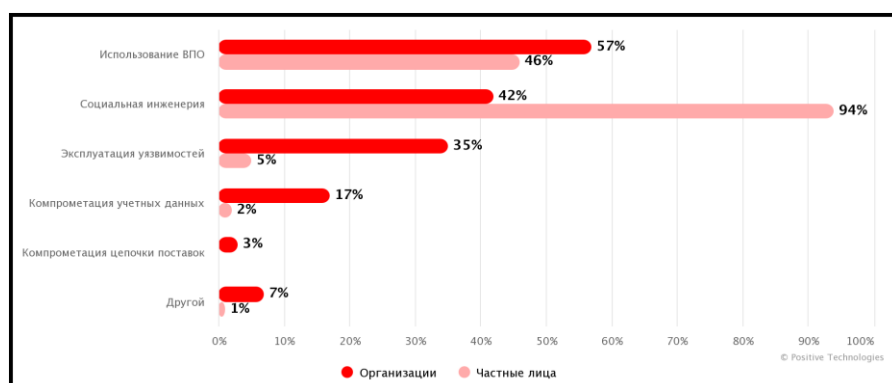


Рис. 2. «Методы атак (доля атак) в 2022 году» [2]

Необходимо также упомянуть, что некоторые выданные регуляторами в области информационной безопасности сертификаты соответствия на зарубежные UTM/NGFW-решения отозваны, либо с большой долей вероятности не будут продлеваться в виду ухода компаний-производителей с российского рынка. Это говорит о том, что данные средства защиты информации уже сейчас не могут, либо в скором времени не смогут использоваться как сертифицированные.

### III. Сравнение отечественных и зарубежных UTM/NGFW-решений

В таблице 1 сравниваются только основные характерные функции, с помощью которых можно наиболее точно продемонстрировать разницу между отечественными и зарубежными UTM/NGFW-решениями.

Отечественными UTM/NGFW-решениями в таблице 1 являются «Комплекс безопасности «Континент 4» и «Универсальный шлюз безопасности «UserGate», зарубежными – «Fortigate NGFW» и «Palo Alto Networks NGFW».

Таблица 1

Сравнение отечественных и зарубежных UTM/NGFW-решений

Параметр сравнения	«Комплекс безопасности «Континент 4» [3]	«Универсальный шлюз безопасности «UserGate» [4]	«Fortigate NGFW» [5]	«Palo Alto Networks NGFW» [6]
Виртуальное / аппаратное исполнение	Имеются оба варианта	Имеются оба варианта	Имеются оба варианта	Имеются оба варианта

Сертификаты	ФСТЭК России №4496 до 14.12.2026	ФСТЭК России №3905 до 26.03.2026	Отсутствует	Отсутствует
СОВ/СПВ	Имеются оба варианта, работает только по схеме «в разрыв»	Имеются оба варианта	Имеются оба варианта	Имеются оба варианта
Контроль приложений	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
Внедрение собственных приложений	Через обращение к производителю, а также на основе атрибутов других приложений	Через обращение к производителю	Возможность написания собственных сигнатур приложений	Возможность написания собственных сигнатур приложений
Анализ почтового трафика	Отсутствует	Да, по протоколам SMTP(S) и POP3(s)	Да, по протоколам IMAP(S), POP3(S), SMTP(S)	Да, по протоколам IMAP(S), POP3(S), SMTP(S)
L2/L3-VPN	Имеются оба варианта	Только L3-VPN	Имеются оба варианта	Имеются оба варианта
SSL-инспекция	TLS 1.1 – 1.2, поддержка сертификатов, подписанных только внутренним корневым Удостоверяющим центром	TLS 1.1 – 1.3, не поддерживается алгоритм подписи rsassa-Pss	TLS 1.1 – 1.3	TLS 1.1 – 1.3
WEB-фильтрация	Защита от вредоносных веб-сайтов на основе репутации, потоковый антивирус (на базе хэшей), отправка на внешнюю систему по протоколу ICAP	Защита от вредоносных веб-сайтов на основе репутации, потоковый антивирус (на базе хэшей), отправка на внешнюю систему по протоколу ICAP	Защита от вредоносных веб-сайтов на основе репутации, потоковый антивирус, отправка на внешнюю систему по протоколу ICAP	Защита от вредоносных веб-сайтов на основе репутации, потоковый антивирус, отправка на внешнюю систему по протоколу ICAP

Как можно заметить из таблицы 1, большинство перечисленных функций заявлены во всех рассматриваемых UTM/NGFW-решениях, но важно обращать внимание на детали. К примеру, возможность шифрования каналов связи имеется во всех рассматриваемых продуктах, но в «Универсальном шлюзе безопасности «UserGate» отсутствует L2-VPN. Кроме того, везде присутствует SSL-инспекция, но в «Комплексе безопасности «Континент 4» не поддерживается протокол TLS 1.3.

Наиболее полный и вместе с тем одинаковый набор функций присутствует именно в зарубежных UTM/NGFW-решениях (за исключением сертификатов регуляторов).

#### **IV. Проблема импортозамещения UTM/NGFW-решений**

То, что корректно работало в зарубежном UTM/NGFW-решении, может функционировать не совсем так, как требуется, при выборе отечественного аналога. Ярким примером служат SSL-инспекция, работа СОВ/СПВ, написание собственных сигнатур приложений и т. д. (таблица 1), качество работы которых не всегда соответствует ожиданиям, сформировавшимся после использования зарубежных решений.

Перед принятием решения о приобретении того или иного продукта важно провести тщательный анализ действующей сетевой инфраструктуры, а также особенностей и возможностей планируемых к приобретению UTM/NGFW-решений: внимательно изучить эксплуатационную и техническую документацию, определить для себя наиболее критичные функции (например, опираясь на опыт использования зарубежных аналогов) и оценить возможность их реализации при использовании отечественного решения, получить консультацию по спорным вопросам у производителя решения (или его представителей), а также обязательно опробовать решение на практике – провести пилотное тестирование – , поскольку далеко не всегда возможна «прозрачная» интеграция оборудования.

Таким образом, только получение максимального объема информации о решении и предварительная проверка его работоспособности могут позволить принять грамотное и взвешенное решение при выборе UTM/NGFW, способного в полной мере выполнять заявленные функции и обеспечивать максимальную защищенность инфраструктуры.

#### **V. Заключение**

Импортозамещение шлюзов для комплексной защиты от сетевых угроз необходимо осуществлять, особенно в настоящее время. Подходящие аналоги уже есть на отечественном рынке. Подавляющее число функций во всех современных UTM/NGFW-решениях схожее, но при выборе подходящего продукта очень важно обращать внимание на детали и в любом случае быть готовым к перестройке (расширению) своей сетевой структуры для обеспечения максимально корректной работы UTM/NGFW.

#### **Библиографический список**

1. Защита периметра сети распределенной системой обнаружения вторжений. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-perimetra-seti-raspredelennoy-sistemoy-obnaruzheniya-vtorzheniy/viewer> (дата обращения: 15.03.2023).
2. Актуальные киберугрозы: IV квартал 2022 года. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q4/> (дата обращения: 15.03.2023).
3. Документация Континент 4. URL: <https://www.securitycode.ru/products/kontinent-4/?tab=support> (дата обращения: 15.03.2023).
4. USERGATE 7 Руководство администратора. URL: <https://support.usergate.com/ru/docs/version/7.x/usergate-7> (дата обращения: 15.03.2023).
5. FortiGate / FortiOS Admin Guides. URL: <https://docs.fortinet.com/product/fortigate/7.2> (дата обращения: 15.03.2023).
6. Next-Gen Firewall Software Documentation. URL: <https://docs.paloaltonetworks.com/ngfw> (дата обращения: 15.03.2023).

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Е. Барищук, 2023

Д. И. Ворм

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ВИРУСОВ НА ГРАФАХ С РАЗНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ УЗЛОВ

**Аннотация.** Настоящая статья посвящена исследованию распространения компьютерных вирусов на графах с разным количеством узлов. В работе был проведен анализ влияния количества узлов на эффективность распространения вирусов на графах. Были проанализированы параметры графа, такие как вероятность заражения, скорость распространения, и проведены эксперименты на графах с различным количеством узлов.

**Ключевые слова:** компьютерные вирусы, графы, распространение вирусов, скорость распространения, плотность графа, алгоритмы, защита информации.

### I. Введение

В настоящее время использование компьютеров и мобильных устройств для обмена информацией и проведения онлайн-транзакций становится все более распространенным, а в связи с этим увеличивается риск заражения компьютерными вирусами. Компьютерные вирусы могут причинить серьезный ущерб не только отдельным пользователям, но и всему сообществу.

Целью исследования является выявление скорости распространения вируса на графах с разным количеством узлов и выявление факторов, влияющих на скорость распространения вируса. Для достижения цели исследования были проведены эксперименты с различными графами, а также использованы методы моделирования распространения вируса.

### II. Постановка задачи

Задачами данной научной статьи является изучение основных моделей графов, используемых для описания сетевых структур, выбор подходящей модели для исследования, изучение основных способов распространения компьютерных вирусов и выбор подходящего способа для исследования, проведение экспериментального исследования распространения вирусов на графах с разным количеством узлов. Затем проанализировать результаты эксперимента и выявить зависимость скорости распространения вируса от характеристик графа, таких как степень связности, количество узлов и т.д.

### III. Описание используемой модели

Для моделирования распространения вируса на графах, в данной статье будет использована модель *SI*. *SI* - это модель распространения заболевания, которое может быть применено к распространению вирусов. В этой модели каждый узел может быть в одном из двух состояний: *S* (susceptible - подверженный), *I* (infected - зараженный) [1]. В данной статье будут продолжены исследования усовершенствованной модели, описанной в [2, 3].

В начале моделирования все узлы находятся в состоянии *S*. Затем случайный узел выбирается для инфицирования. Этот узел переходит в состояние *I*. Затем в каждый момент времени каждый зараженный узел может заразить своих соседей. Вероятность выздоровления учтена не будет. Вероятность заражения зависит от параметра  $\beta$ .

Параметры модели.

Для моделирования распространения вируса на графах используются следующие параметры:

- $N$  – количество узлов в графе;
- $\beta$  – вероятность заражения в каждый момент времени;
- $C$  – связность сети;
- $I$  – начальное количество зараженных узлов;
- $D$  – количество повторений эпидемии.

#### IV. Эксперимент

В эксперименте мы будем использовать следующие значения параметров:

$C = 0.1$  (постоянная);

$I = 1$  (постоянная);

$D = 1000$  (постоянная);

$N = 100, 200, 300, \dots$ ;

$\beta = 0.01, 0.055, 0.075, 0.0325$ ;

$T$  = среднее время распространения эпидемии (вычисляемое).

Для эксперимента будет использована программа, написанная на языке C++, которая показывает среднее время распространения эпидемии при разных значениях [4].

Результаты моделирования

Данные, указанные на рис. 1, показывают то, что при первом эксперименте  $N=100$ ,  $T=134.664322$ , данный формат нужен для занесения данных в программу WolframMathematica, которая построит нам график, указывающий на зависимость среднего времени распространения эпидемии от количества узлов.

{ {100,134.664322}, {200,68.64}, {300,47.953}, {400,38.322}, {500,31.804}, {600,27.395}, {700,24.306}, {800,22.106}, {900,20.25}, {1000,18.857}, {1100,17.536}, {1200,16.577}, {1300,15.645}, {1400,14.973}, {1500,14.328}, {1600,13.666}, {1700,13.205}, {1800,12.731}, {1900,12.321}, {2000,11.921}, {2100,11.664}, {2200,11.29}, {2300,10.99}, {2400,10.686}, {2500,10.488}, {2600,10.242}, {2700,10.047}, {2800,9.813}, {2900,9.617}, {3000,9.456}, {3100,9.303}, {3200,9.163}, {3300,9.002}, {3400,8.882}, {3500,8.723} }

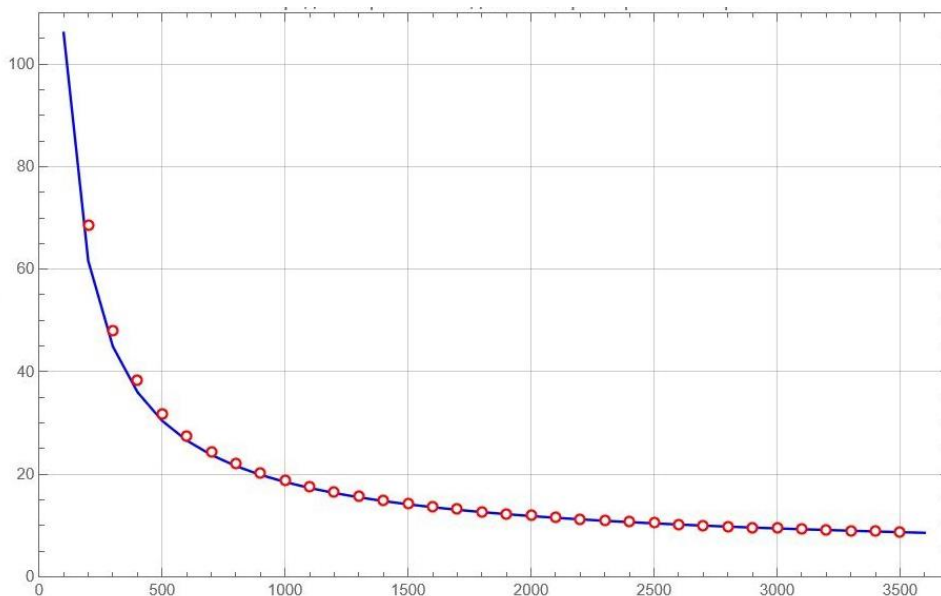


Рис. 1. Зависимость среднего времени эпидемии при  $N=100-3500$ ,  $\beta = 0.01$

Рассмотрим распространение вируса на графах с разным количеством узлов.

Далее будет рассмотрено среднее время эпидемии при  $N = 100-3500$ ,  $\beta = 0.0325$  (на рисунке 2).



{ {100,43.078156}, {200,23.022}, {300,16.917}, {400,13.745}, {500,11.823}, {600,10.58}, {700,9.648}, {800,8.891}, {900,8.392}, {1000,7.934}, {1100,7.526}, {1200,7.238}, {1300,7.023}, {1400,6.786}, {1500,6.519}, {1600,6.334}, {1700,6.172}, {1800,6.071}, {1900,6.007}, {2000,5.928}, {2100,5.798}, {2200,5.66}, {2300,5.531}, {2400,5.37}, {2500,5.231}, {2600,5.171}, {2700,5.09}, {2800,5.062}, {2900,5.03}, {3000,5.025}, {3100,5.014}, {3200,5.007}, {3300,5.002}, {3400,5}, {3500,4.996} }.

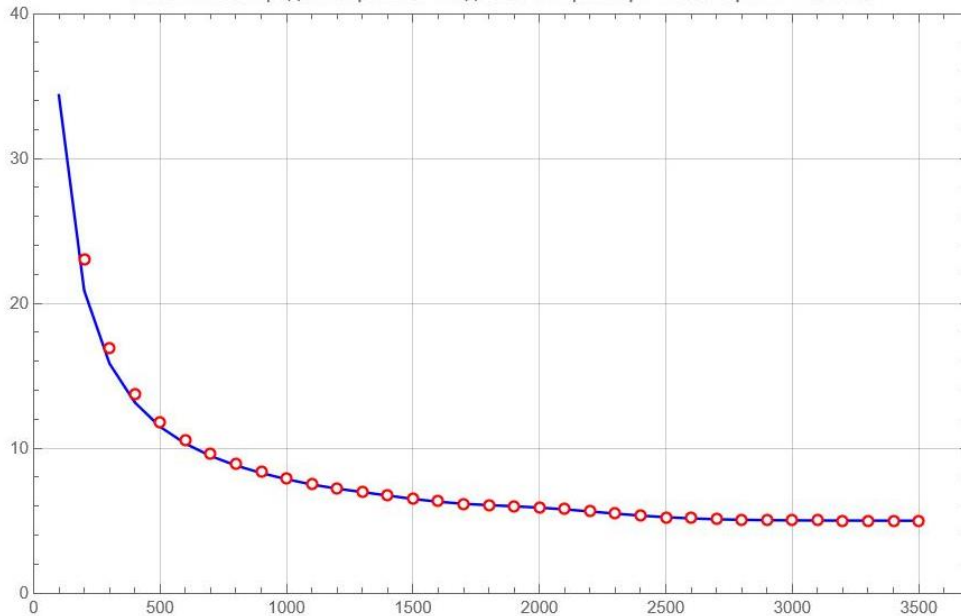


Рис. 2. Зависимость среднего времени эпидемии при  $N = 100-3500$ ,  $\beta = 0.0325$

Далее будет рассмотрено среднее время эпидемии при  $N = 100-3500$ ,  $\beta = 0.055$ .

{ {100,26.293882}, {200,14.616}, {300,10.994}, {400,9.221}, {500,8.168}, {600,7.408}, {700,6.888}, {800,6.425}, {900,6.123}, {1000,5.908}, {1100,5.685}, {1200,5.425}, {1300,5.188}, {1400,5.09}, {1500,5.038}, {1600,5.006}, {1700,4.983}, {1800,4.959}, {1900,4.86}, {2000,4.76}, {2100,4.597}, {2200,4.459}, {2300,4.318}, {2400,4.186}, {2500,4.115}, {2600,4.078}, {2700,4.044}, {2800,4.019}, {2900,4.013}, {3000,4.006}, {3100,4}, {3200,4.001}, {3300,4}, {3400,4}, {3500,4} }.

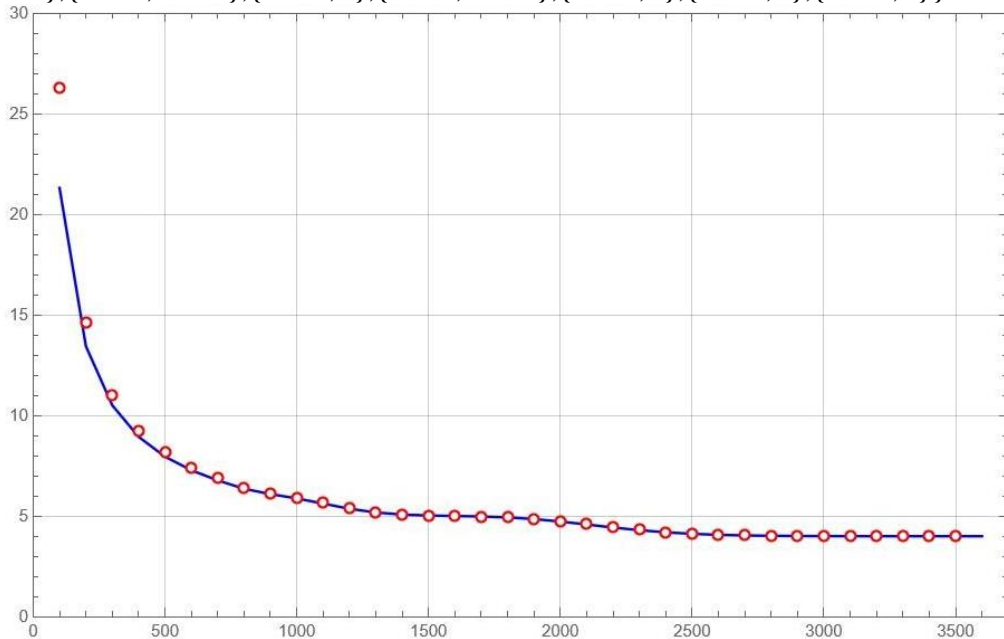


Рис. 3. Зависимость среднего времени эпидемии при  $N = 100-3500$ ,  $\beta = 0.055$

Далее будет рассмотрено среднее время эпидемии при  $N = 100-3500$ ,  $\beta = 0.075$ .

{100,20.073073},{200,11.413},{300,8.738},{400,7.474},{500,6.691},{600,6.141},{700,5.775},{800,5.39},{900,5.16},{1000,5.043},{1100,4.974},{1200,4.902},{1300,4.738},{1400,4.522},{1500,4.32},{1600,4.18},{1700,4.084},{1800,4.05},{1900,4.019},{2000,4.005},{2100,4.003},{2200,4},{2300,4},{2400,4},{2500,4},{2600,4},{2700,3.999},{2800,4},{2900,4},{3000,4},{3100,4},{3200,4},{3300,3.999},{3400,3.999},{3500,3.995}

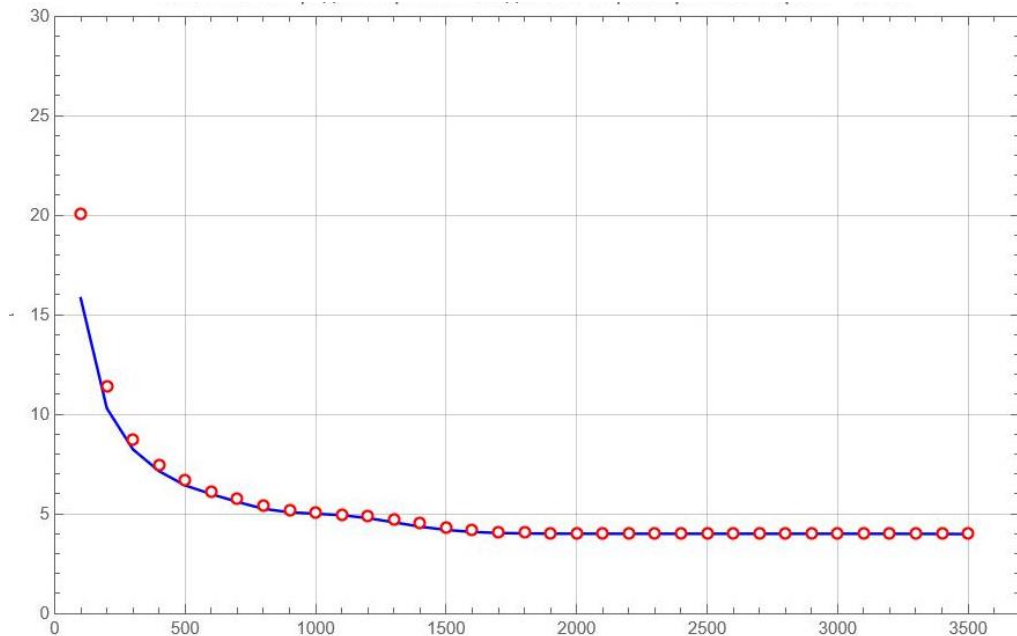


Рис. 4. Зависимость среднего времени эпидемии при  $N = 100-3500$ ,  $\beta = 0.075$

### V. Итоги эксперимента

Для исследования зависимости распространения вирусов на графах с различным количеством узлов были выбраны графы с количеством узлов от 100 до 3500.

В результате экспериментов было выявлено, что вирус распространяется на графах с большим количеством узлов быстрее, чем на графах с меньшим количеством узлов. Это связано с тем, что на графах с большим количеством узлов вероятность заражения каждого узла больше, поскольку соседние узлы имеют более плотную связность.

Для более подробного анализа зависимости распространения вирусов на графах с различным количеством узлов, были построены графики, показывающие изменение количества зараженных узлов в зависимости от времени для различных графов с разным количеством узлов. На графиках были отмечены различные начальные условия, такие как количество зараженных узлов, вероятность заражения соседних узлов, но при этом –  $\delta$  равна нулю. Из графиков можно увидеть, что на графах с большим количеством узлов время, необходимое для полного распространения вируса, уменьшается.

### VI. Заключение

Исследование зависимости распространения компьютерных вирусов на графах с различным количеством узлов показало, что среднее время распространения эпидемии на графах с большим количеством узлов значительно меньше, чем на графах с меньшим количеством узлов. Результаты этого исследования могут быть полезны для разработки более эффективных методов борьбы с компьютерными вирусами и защиты информации. Дальнейшие исследования могут включать анализ других моделей распространения вирусов на графах и анализ влияния структуры графа на эффективность различных методов борьбы с распространением вируса.

Научный руководитель: Магазев Алексей Анатольевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Billings L., Spears M. W. Schwartz I. B. A unified prediction of computer virus spread in connected networks // Physics Letters A. 2002. V. 297. P. 261-266.
2. Бельченко А. О., Магазев А. А., Никифорова А. Ю. Приближённая оценка среднего числа заражённых узлов в марковской модели распространения компьютерных вирусов // Математические структуры и моделирование. 2022. № 1 (61). С. 92-104.
3. Магазев А. А., Никифорова А. Ю. О вероятности заражения восприимчивого узла в модели Рида-Фроста // Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2020. Т. 7. № 4. С. 34-41.
4. Магазев А. А., Никифорова А. Ю. Программа для оценки среднего времени распространения компьютерного вируса в сетях, ассоциированных со случайными графами: свидетельство о регистрации электронного ресурса. М. : ФИПС, 2023. № 2023614819 от 06.03.2023.

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 13.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. И. Ворм, 2023

УДК 004.056.55

*С. А. Дорогов, Е. В. Трапезников*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## МЕТОД СОКРЫТИЯ ДАННЫХ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ СКРЫТОГО ФАЙЛОВОГО КОНТЕЙНЕРА

**Аннотация:** В статье рассматривается сокрытие данных методом отрицаемого шифрования, реализуется скрытый файловый контейнер внутри шифрованного тома. Описаны актуальные требования безопасности для защиты скрытых томов, а также проблемы и способы их обнаружения.

**Ключевые слова:** отрицаемое шифрование, атака с принуждением, скрытый контейнер, защита информации, шифрованный файл, криптоконтейнер.

### I. Введение

Повсеместное использование цифровых устройств привело к актуализации проблемы защиты хранимой информации от несанкционированного доступа. Для защиты было создано множество криптографических алгоритмов. При использовании криптографии возникает новая проблема, алгоритмы шифрования не позволяют скрыть факт наличия информации в шифрованных данных [1]. Для решения данной проблемы существуют методы сокрытия секретной информации внутри несекретной (обманной), конкретно в статье рассматривается случай с шифрованным файловым контейнером.

Шифрованный контейнер (криптоконтейнер) представляет собой файл, расположенный на накопителе и хранящий в себе множество других файлов в зашифрованном виде. Дешифрование происходит путем аутентификации, например, при вводе пароля от контейнера, после чего информация внутри становится доступной для чтения и записи. Криптоконтейнер использует для хранения конфиденциальной информации, так как без ввода пароля контейнер представляет собой обычный файл [2], содержащий случайные данные. Наглядное представление, как выглядит и работает шифрованный контейнер показано на рис. 1.

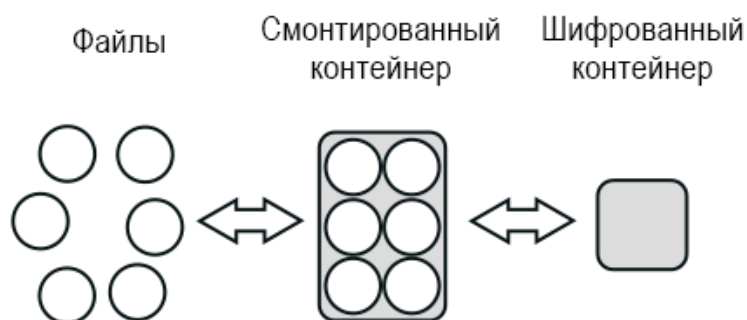


Рис. 1. Схематическое изображение работы криптоконтейнера

Возникают случаи, когда человека принуждают предоставить пароль от своего контейнера, по тем или иным причинам. Стойкость к такого рода атакам с принуждением возможно обеспечить алгоритмами отрицаемого шифрования (ОШ) [3]. Под ОШ понимают способ криптографического преобразования, при котором два или более различного открытого (нешифрованного) текста зашифровывают с использованием двух или более различных ключей. При этом множество открытого текста преобразуется в единый шифротекст (рис. 2).

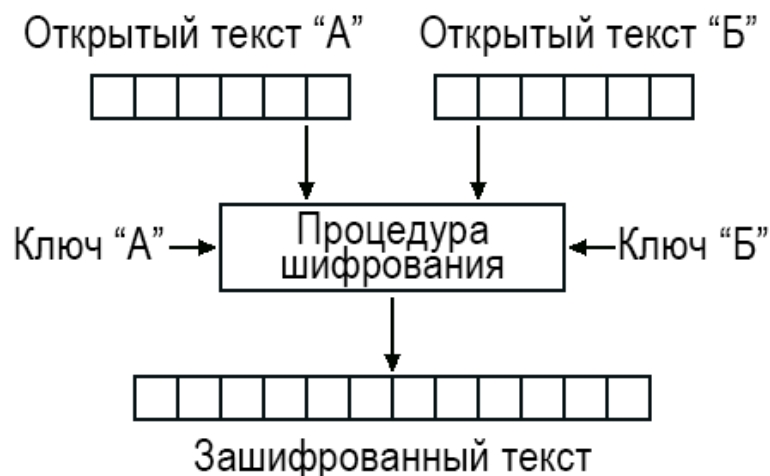


Рис. 2. Процедура шифрования открытого текста

Благодаря тому что в шифрованном контейнере, помимо конфиденциальной информации, находится контейнер-ловушка (данные внутри которого не являются секретными), обеспечивается стойкость к подобным атакам. ОШ позволяет раскрыть один из ключей и расшифровать контейнер, при этом у атакующего нет доводов, которые он бы мог привести в пользу утверждения, что контейнер содержит еще какие-то вложенные контейнеры [4].

## II. Постановка задачи

В работе будет продемонстрирован метод создания скрытого контейнера, при помощи VeraCrypt - ПО свободно распространяющегося в Интернете. ОШ в TrueCrypt реализовано за счет возможности создавать скрытые контейнеры и скрытые операционные системы. Скрытый контейнер в понимании разработчиков ПО – зашифрованный том, расположенный в области другого зашифрованного тома (в пределах свободного места, рис. 3) [5].

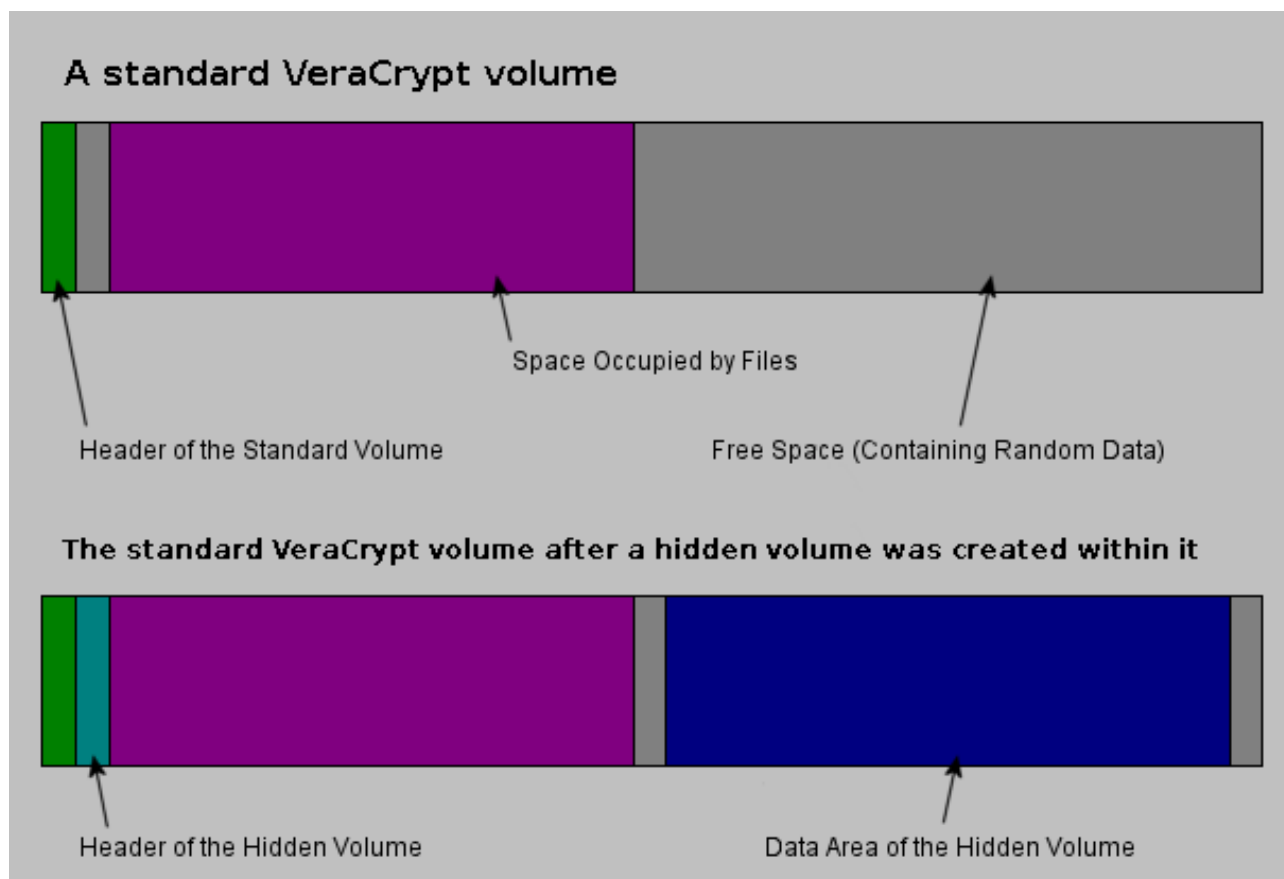


Рис. 3. Изображение зашифрованного тома до и после создания скрытого тома внутри него

Разработчик VeraCrypt описал алгоритм действий, требования безопасности и меры предосторожности [5], которые необходимо соблюдать, чтобы скрытый том действительно являлся скрытым.

## III. Решение поставленной задачи

Для создания скрытого тома была использована официальная документация [5]. Указываем опцию «Скрытый том» при создании нового тома. Согласно инструкции нам необходимо выбрать пароль для внешнего тома, отличный от пароля для скрытого тома. Далее помещаем файлы в контейнер обманку. В данном примере (рис. 4) лежат: папка – «обычная папка» и файл – «не секретный файл.txt»

Аналогичным образом создается скрытый контейнер, с главным замечанием – пароль должен отличаться от пароля от внешнего тома. Причем рекомендуется использовать более длинный и сложный пароль для скрытого, чем для внешнего тома. Это объясняется тем, что методом прямого перебора паролей внешний том расшифруется раньше, возможно исследователи остановятся на нём и, как говорилось ранее, у атакующего нет доводов, которые он бы мог привести в пользу того, что контейнер содержит еще какие-то вложенные

контейнеры [4]. После чего помещаем файлы в скрытый контейнер. В данном примере (рис. 5) лежат: папка – «секретная папка» и файл – «конфиденциальный файл.txt».

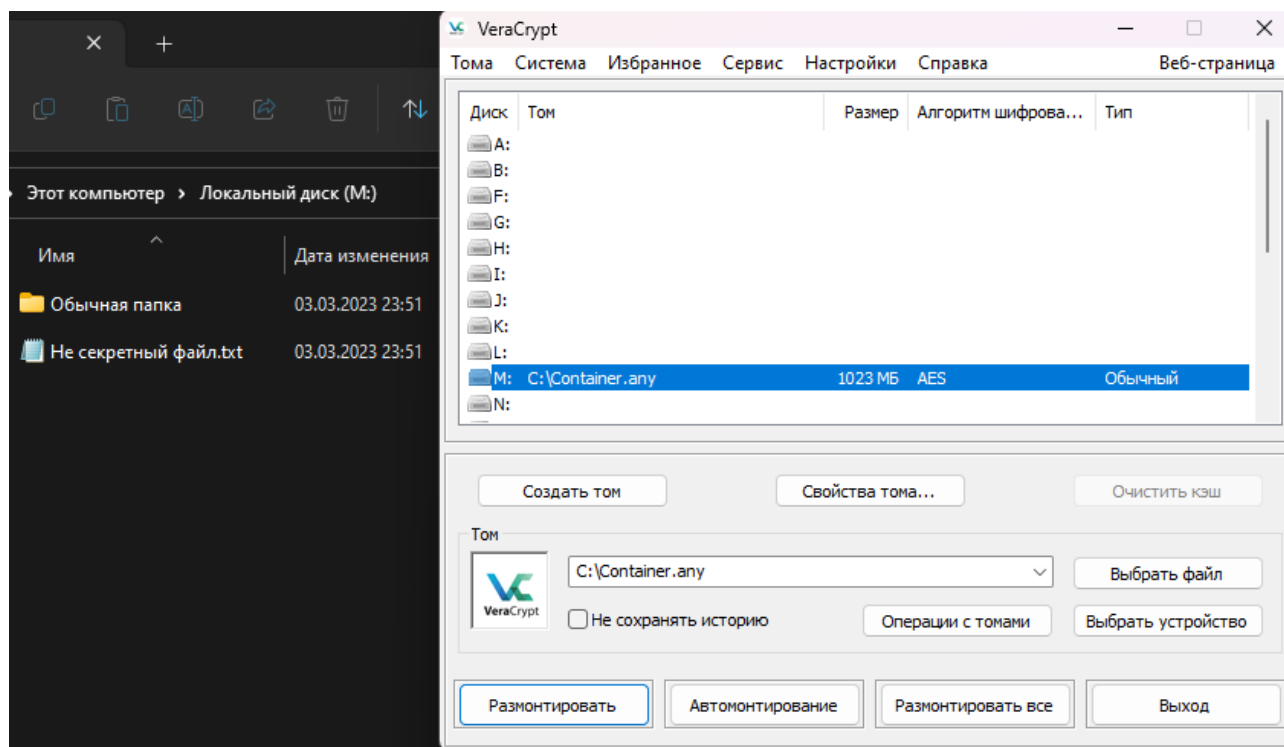


Рис. 4. Смонтированный внешний том

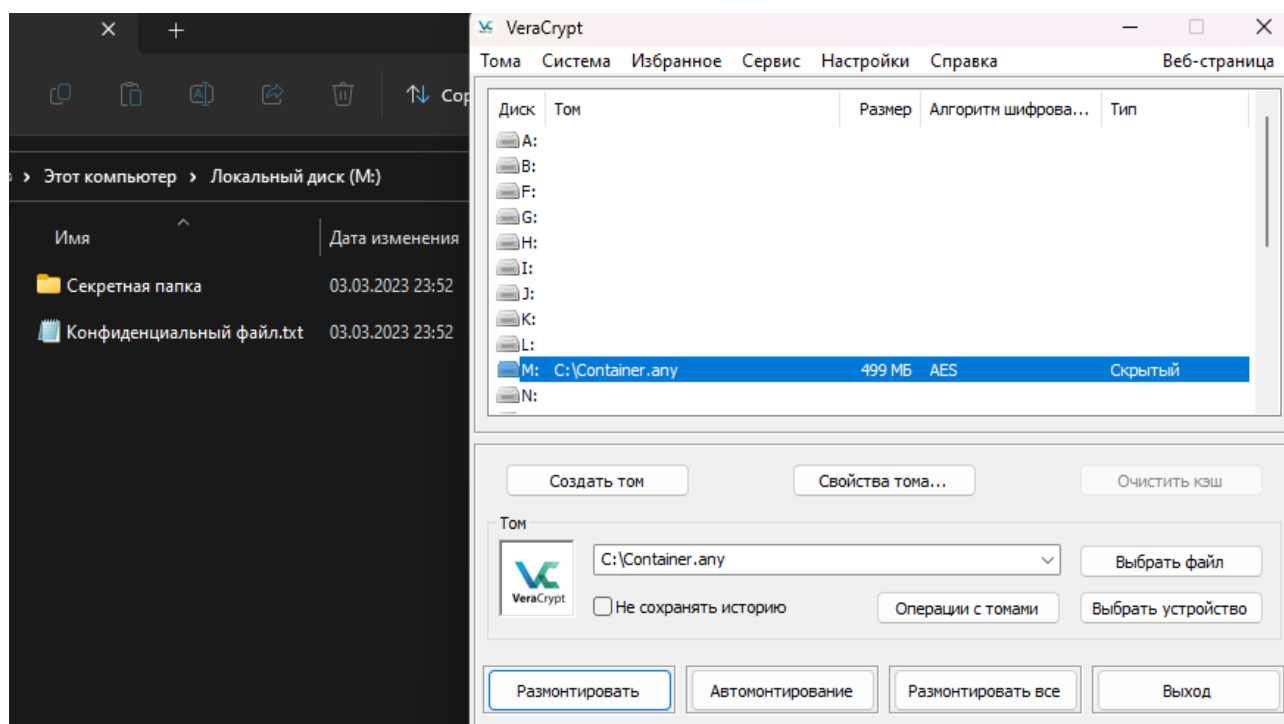


Рис. 5. Смонтированный скрытый том

Одними из основных требований безопасности при работе со скрытыми томами являются [5]:

- отсутствие доступа атакующего к смонтированному зашифрованному тому,
- нет физического доступа к устройству при смонтированном зашифрованном томе,
- не использовать функцию дефрагментации дисков,
- не использовать журналируемую файловую систему,
- отключить индексацию,
- для большей безопасности использовать Live-CD операционную систему,
- отключить файл подкачки,
- не использовать гибернацию,
- отсутствует вредоносное ПО,
- установлен безопасный пароль,
- и другие.

Сообщество людей, использующих скрытые тома, определило множество правил для защиты информации при работе со скрытым томом. Несмотря на их большое количество, их реально соблюдать и создать такие условия, когда атакующий не сможет подтвердить факт наличия скрытого тома. Соответственно, если соблюдать правила, то часть или все конфиденциальные данные могут оказаться за пределами скрытого тома.

#### **IV. Результат**

Скрытый контейнер действительно может сохранить конфиденциальность данных. Защита от принуждающих атак реализована в полной мере, а сообщество пользователей такого рода софта растет, следовательно, растут и меры защищенности, а также устраняются недочеты, баги и уязвимости. С другой стороны, настоящие профессионалы знают о подобных способах защиты, и не каждый пользователь софта согласится соблюдать гигантский список условий и мер предосторожностей, которые ограничивают пользователя в действиях. Но при соблюдении данных требований конфиденциальные данные остаются в сохранности.

#### **Библиографический список**

1. Ремизов А. В., Рогозин О. В., Филиппов М. В. Сокрытие конфиденциальной информации с использованием специальной файловой системы // Вестник УМО. 2013. №3. С. 194-196.
2. Неупокоева И. А. Осмотр зашифрованных файлов. Тактические особенности и криминалистические рекомендации // Закон и Право. - 2020. №8. С. 142-144.
3. Бойченко О. В., Костюк В. В. Построение алгоритмов отрицаемого шифрования // Проблемы информационной безопасности: труды V Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, 14-16 февраля 2019 г. Симферополь-Гурзуф, 2019. С. 103-104.
4. Биричевский А. Р., Молдовян Н. А., Березин А. Н., Рыжков А. В. Способ отрицаемого шифрования // Вопросы защиты информации. 2013. № 2 (101). С. 18-21.
5. VeraCryptDocumentation URL: [www.veracrypt.fr/en/Documentation.html](http://www.veracrypt.fr/en/Documentation.html) (дата обращения: 02.03.2023).

*Дата поступления статьи: 21.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© С.А. Дорогов, Е.В. Трапезников, 2023

*В. И. Зуева*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **О ПРИМЕНЕНИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ДАННЫХ С USB-НАКОПИТЕЛЯ**

**Аннотация.** Как и любые устройства, USB-накопители порой подвергаются воздействию процессов, которые приводят носитель к неисправности, а также и возможной потере данных. Поэтому специалистам в области информационной безопасности необходимо владеть навыками по обнаружению и восстановлению данных с флэш-носителей. В настоящей работе представлен опыт применения специального программного обеспечения для восстановления удаленных данных из памяти USB-накопителя.

**Ключевые слова:** USB-накопитель, программное обеспечение, удаленные данные, восстановление данных.

### **I. Введение**

Почти каждый пользователь хотя бы раз сталкивался с проблемой, когда важные данные с накопителя были утеряны. Удаление или повреждение файлов могло произойти в результате ряда случайных или намеренных действий. Но не все знают о том, что информацию, которая была удалена, можно восстановить.

Специалисту, проводящему исследование флэш-накопителя, стоит знать процесс удаления, свойственный для операционных систем (ОС) семейства Windows. При удалении файла изменения вносятся лишь в информацию о файлах и папках, показывающие, что файл был удален, при этом сохраняются метаданные файла, пока они не заменятся на метаданные нового файла. В некоторых операционных системах целиком разрушается файловая запись. Однако во всех ОС независимо от разрушения файловых записей данные на носителе остаются нетронутыми до их перезаписи [1].

Средства, необходимые для восстановления, зависят от характера и причины потери данных. Существуют аппаратно-программные комплексы, они включают в себя электронные схемы, подменяющие или дополняющие штатную электронику носителей информации, и программное обеспечение. В более доступном случае есть специализированные программы, работающие в среде MS-DOS или Windows [2].

Существует множество программных средств для поиска и восстановления утерянных файлов, например, такие как: *NetmanPartition Recovery*, *Recuva*, *Wondershare Active@UNDELETE*, а также и другие. В целом они похожи, но все равно каждая программа отличается своей функциональностью и качеством работы. В данной статье представлены результаты использования вышеназванных программ для восстановления удаленных данных с USB-накопителя.

### **II. Постановка задачи**

Прежде всего специалист должен знать, что произошло с данными - было это удаление одного файла, форматирование или сбой в файловой системе. Также нужно определить тип файловой системы. Исходя из двух этих пунктов, необходимо выбрать нужный алгоритм восстановления и соответствующее программное обеспечение.

Перед тем как приступить к процедуре восстановления, полезно ответить на следующие вопросы:

- какого типа данные были утеряны;
- на каком носителе размещались данные;
- каким образом были созданы/получены утраченные данные;



- какова причина утраты/повреждения данных [3].

### III. Исследование

В настоящей работе для исследуемого USB-накопителя с файловой системой FAT32 для поиска и восстановления удаленных данных были протестированы следующие программы, которые находятся в свободном доступе: HetmanPartition Recovery, Recuva, Active@ UNDELETE.

Работа включала в себя следующие шаги:

- 1) подключение накопителя к компьютеру;
- 2) создание файлов различного типа на носителе;
- 3) удаление файлов двумя способами: обычным удалением и быстрым форматированием;
- 4) попытка восстановления файлов.

HetmanPartition Recovery - программа, в основе которой содержится алгоритм поиска удаленных данных, позволяющий восстановить нечаянно или намеренно удаленные файлы в полном объеме. Восстановить информацию можно не только с USB-накопителя, но и с любого другого носителя, работающего под управлением файловых систем FAT и NTFS. При обработке информации HetmanPartition Recovery использует передовой метод сигнатурного анализа [4].

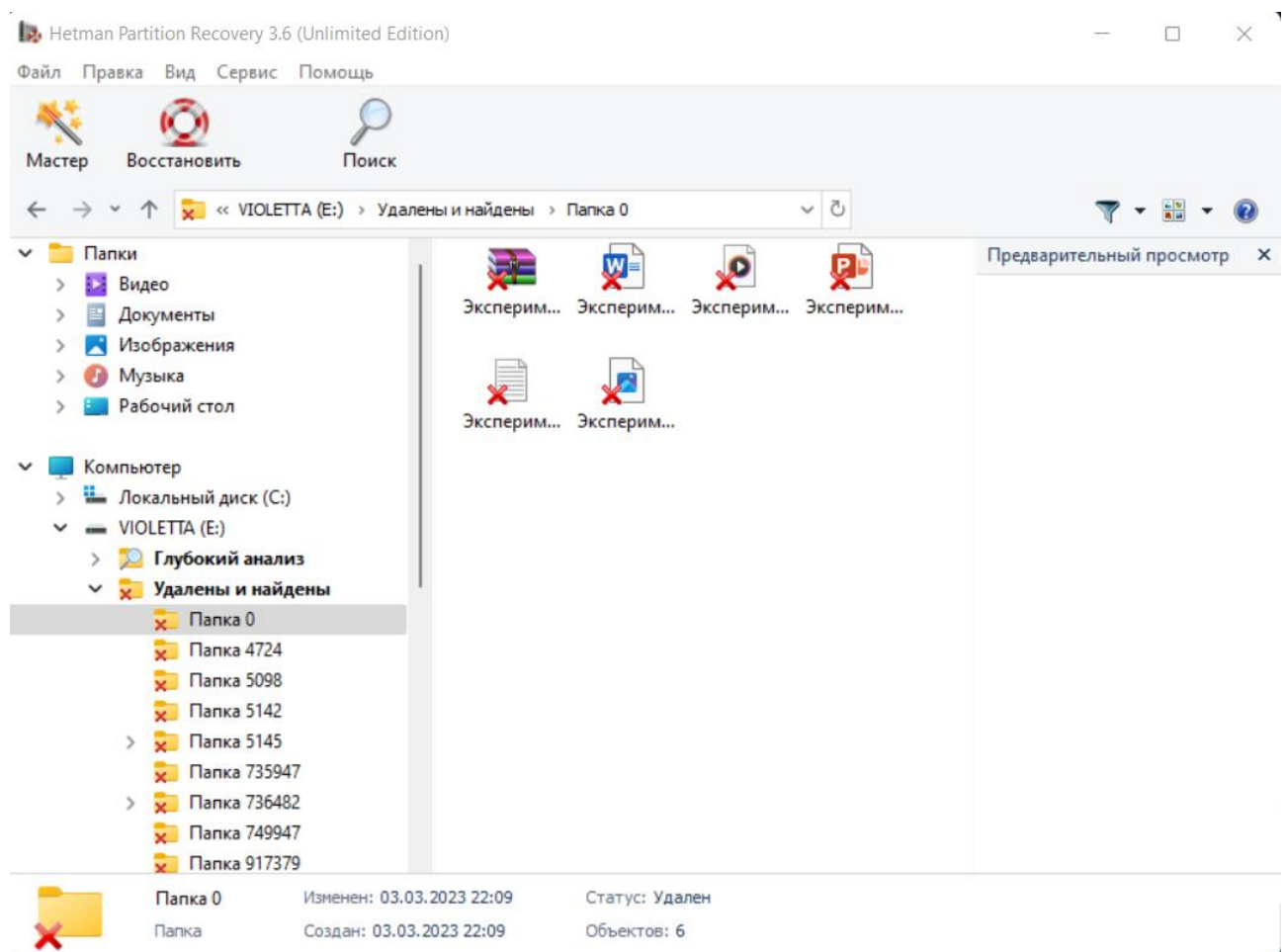


Рис. 1. Найденные удаленные файлы в HetmanPartition Recovery

При запуске появляется мастер настройки, который помогает выбрать параметры восстановления. Если необходимо восстановить конкретные типы файлов, можно их

отдельно отметить, но в данном случае был произведен поиск всех удаленных файлов с полным анализом (поиск всевозможной информации).

После завершения сканирования, и при обычном удалении, и при быстром форматировании USB-накопителя, отобразился список найденных удаленных данных, стоит отметить, что структура папок и файлов была сохранена. Выбрав нужные файлы, нажали на кнопку «Восстановить» и указали папку для их сохранения.

Recuva является утилитой для поиска, редактирования и восстановления информации на жёстких дисках, RAID-массивах и флэш-накопителях. [5]

После запуска программы появляется мастер настройки, который помогает выбрать параметры восстановления. Также есть возможность отметить конкретные типы файлов, которые необходимо восстановить. В данном случае был произведен поиск всех удаленных файлов с глубоким анализом. Мастер восстановления уведомляет, что этот режим нужно использовать, если после простого поиска файлы не были найдены.

Как завершилось сканирование, и при обычном удалении, и при быстром форматировании USB-накопителя, отобразился список найденных удаленных данных, но структура папок не сохранилась. Выбрав нужные файлы, нажали на кнопку «Восстановить» и указали папку для их сохранения.

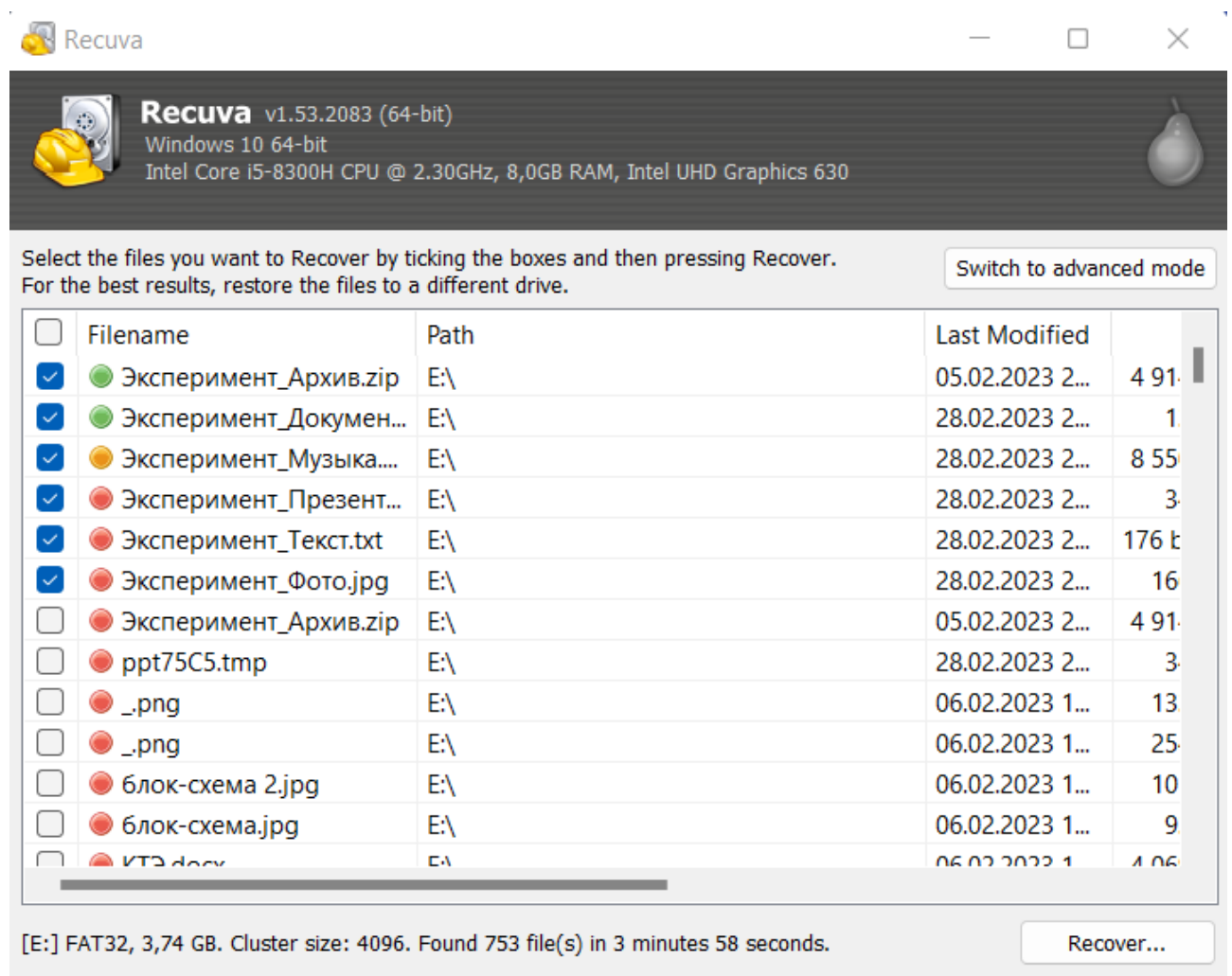


Рис. 2. Найденные удаленные файлы

Active@ UNDELETE - программа для восстановления удаленных или поврежденных файлов и логических разделов. Поддерживает носители с файловыми системами FAT, NTFS и другие, а также все типы файлов.

При запуске появляется мастер настройки, который также помогает выбрать параметры восстановления и устройство, с которого необходимо восстановить данные.

После завершения сканирования при обычном удалении программе удалось найти все удаленные файлы и их восстановить.

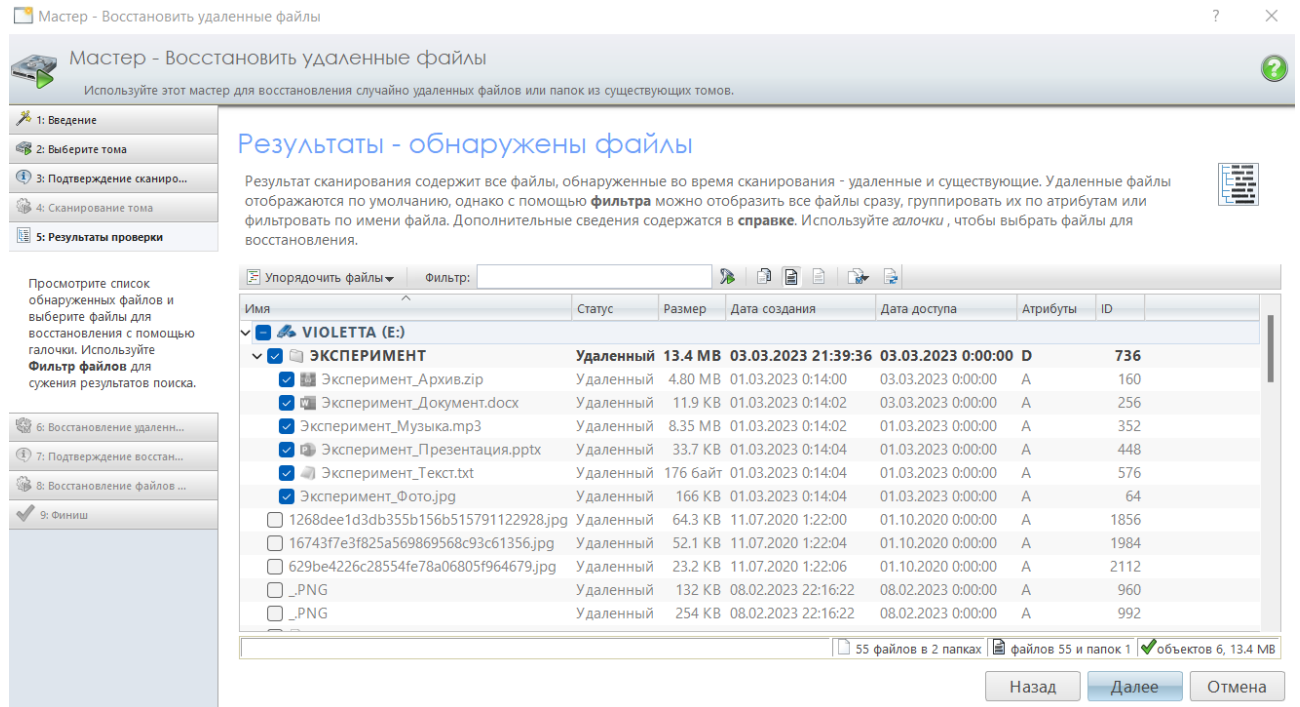


Рис. 3. Обнаруженные удаленные файлы после обычного удаления

Но при быстром форматировании USB-накопителя отобразился пустой список, поэтому восстановление не было возможным.

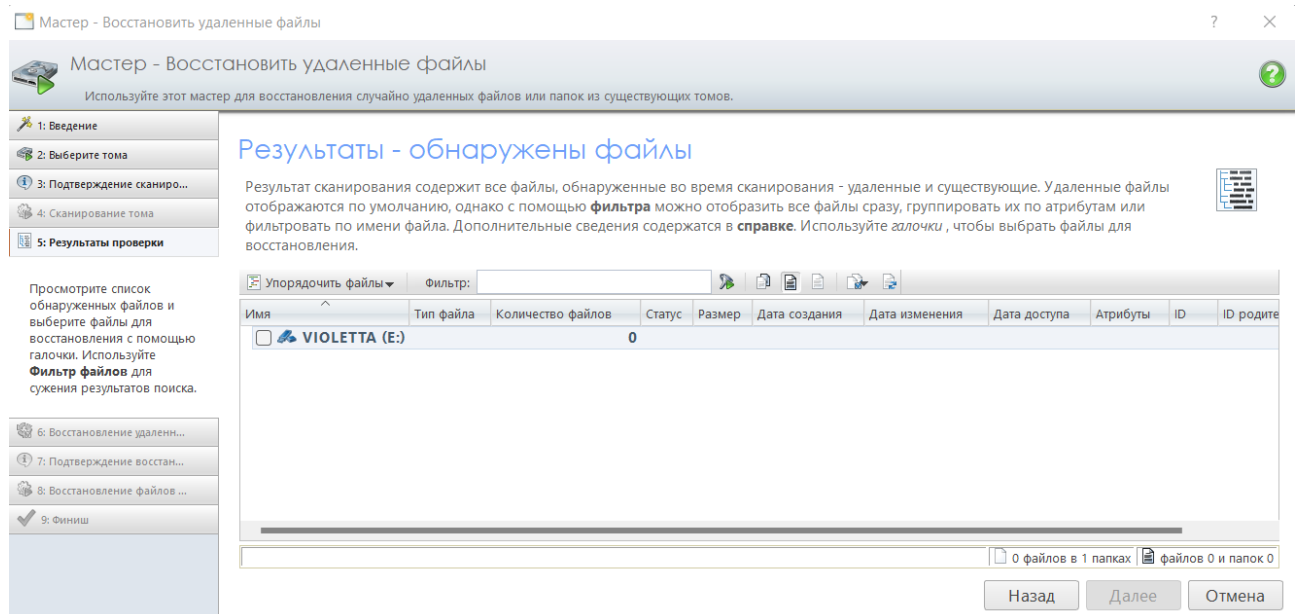


Рис. 4. Обнаруженные файлы после быстрого форматирования

Ниже в таблице 1 представлены результаты тестирования вышеперечисленного программного обеспечения.

Таблица 1

**Результаты тестов восстановления**

Программа	Обычное удаление	Быстрое форматирование	Сохранение структуры файлов и папок	Ограничение пробной версии
Netman Partition Recovery	100%	100%	Да	Нельзя восстановить, работает только предпросмотр
Recuva	100%	100%	Нет	Нет
Active@ UNDELETE 11	100%	0%	Да	Можно восстановить файлы, но размером не более 1 МБ

**IV. Заключение**

После проведенного тестирования в заключении можно отметить, что программы хорошо справляются со своей задачей, но невозможно однозначно отметить лучшую из них. Безусловно, при восстановлении удаленных данных специалисту стоит иметь в арсенале несколько программных средств, так как для разного вида проблем необходимо использовать ту или иную программу.

Научный руководитель Данилова Ольга Тимофеевна, Омский государственный технический университет.

**Библиографический список**

1. Гулятьев А. К. Восстановление данных. 2-е изд. СПб.: Печатный двор им. А. М. Горького, 2006. 378 с.
2. Ташков П. А. Восстановление данных на 100%. СПб.: Питер, 2009. 208 с.
3. Сенкевич Г. Е. Искусство восстановления данных. СПб: БХВ-Петербург, 2021. 288 с.
4. NetmanPartitionRecovery: восстановить все, что скрыто. URL: <https://naked-science.ru/article/media/hetman-partition-recovery-voss> (дата обращения: 21.03.2023).
5. Как пользоваться Recuva: пошаговая инструкция. URL: <https://hype-time.ru/rukovodstvo/recuva-kak-polzovatsya.html> (дата обращения: 21.03.2023).

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. И. Зуева, 2023

## **АНАЛИЗ КОНФИГУРАЦИЙ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ASTRA LINUX**

**Аннотация.** В представленной работе рассматривается проблема уведомления об экстренном завершении сеанса при срабатывании механизма контроля целостности на основе операционной системы Astra Linux. Предложенное решение позволяет уведомить о блокировке сеанса, задействовав при этом скрипт мониторинга.

**Ключевые слова:** операционная система, Astra Linux, контроль целостности, безопасность, несанкционированные действия.

### **I. Введение**

С каждым годом все более динамично развивается операционная система Astra Linux, используемая для построения и обеспечения информационных систем, обрабатывающих информацию ограниченного доступа, а также сведения составляющие государственную тайну. В настоящее время все чаще данную систему применяют в коммерческих целях, как универсальную систему для построения различных сетевых узлов [1].

Данная операционная система представляет пользователям широкий спектр возможностей по обеспечению конфиденциальности, целостности и доступности защищаемой информации. Для этого ОС оборудована рядом специфических пакетов и утилит таких как:

- защищенную СУБД;
- защищенный комплекс учета документации;
- защищенную систему приложений гипертекстовой обработки данных;
- защищенный комплекс программ электронной почты;

Так как данная операционная система имеет ряд уникальных модулей, задача обнаружения следов несанкционированных действий имеет определенные тонкости, потому, несомненно, является актуальной на данный момент.

Утилита Afick помогает пользователю обнаруживать попытки вторжения в систему, а так позволяет контролировать общую целостность файлов.

Многие другие системы обнаружения вторжений используют различные методы, некоторые ищут неудачные попытки регистрации в системе, другие контролируют активность портов и т.д.

Afick выполняет мониторинг изменений в файловой системе и сообщает пользователю о них, предоставляя выбор решить, ожидалось эти изменения или это является атакой извне.

Данная информация может помочь при расследовании инцидентов, когда нужно определить изменения в системе вследствие несанкционированного доступа. [4].

### **II. Анализ настроек и подход к решению проблемы**

Операционная система Astra Linux оснащена особенной графической подсистемой – «Fly», для которой была реализована специальная мандатная защита. Система рассматривает действия одного пользователя на разных мандатных уровнях, как действия разных сессий, и создает для них отдельные домашние каталоги, ограниченные для прямого доступа третьих лиц.

Для выполнения расширенной проверки подсистемы целостности, создана система Afick, которая позволяет проверять определенные атрибуты файлов при помощи алгоритмов вычисления контрольной суммы (MD5, SHA1), а также взаимодействовать со службой cron. Это позволяет проводить мониторинг с заданной периодичностью на предмет случайных и преднамеренных модификаций файлов и каталогов.

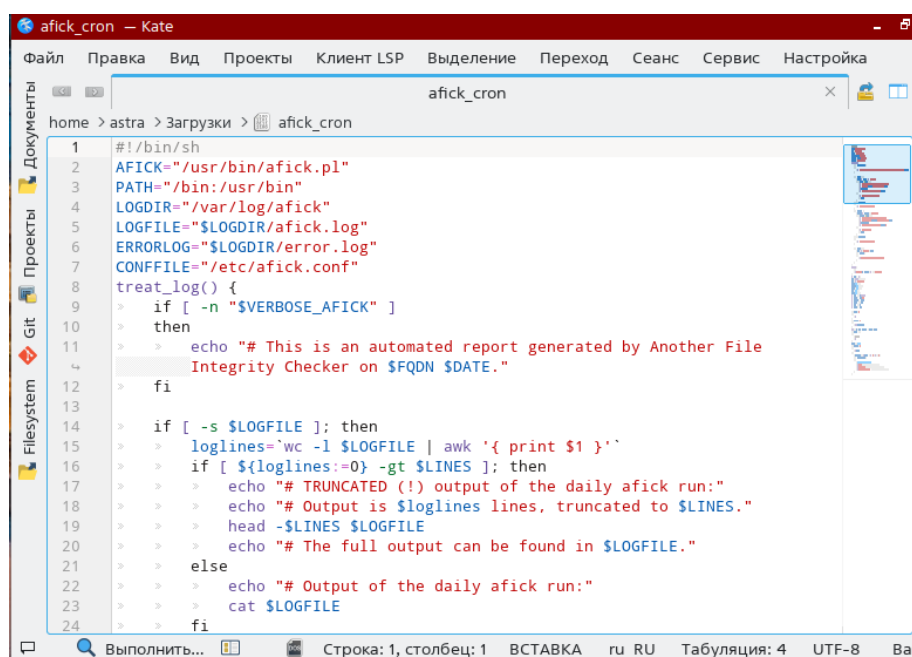
Операционная система Astra Linux оснащена модифицированной версией утилиты Afick, которая дополнительно поддерживает использование алгоритмов расчета контрольных сумм согласно ГОСТ Р 34.11-94 и подсистему безопасного управления атрибутами файлов PARSEC. Как и графическая утилита fly-admin-int-check, Afick основана на библиотеке libgost.

К числу основных файлов конфигурации Afick стоит отнести:

- /afick.conf – файл конфигурации для утилиты
- /afick.cron – файл ежедневного задания для утилиты

### 1. Конфигурация cron

В процессе установки утилита Afick создает базу данных файлов, каталогов и контрольных сумм в формате MD5, соответствующих им. После установки создается файл конфигурации – afick.conf, в который прописываются все пути к защищаемым файлам и каталогам. Он хранится в каталоге /etc, при желании пользователь может очень быстро его редактировать, добавляя новые данные для мониторинга. Cron файл содержит конфигурации для мониторинга, то есть своего рода правила сканирования с определенной периодичностью.



```
1 #!/bin/sh
2 AFICK="/usr/bin/afick.pl"
3 PATH="/bin:/usr/bin"
4 LOGDIR="/var/log/afick"
5 LOGFILE="$LOGDIR/afick.log"
6 ERRORLOG="$LOGDIR/error.log"
7 CONFFILE="/etc/afick.conf"
8 treat_log() {
9 > if [ -n "$VERBOSE_AFICK" ]
10 > then
11 > echo "# This is an automated report generated by Another File
12 > Integrity Checker on $FQDN $DATE."
13 > fi
14 > if [ -s $LOGFILE ]; then
15 > loglines='wc -l $LOGFILE | awk '{ print $1 }''
16 > if [ ${loglines:=0} -gt $LINES ]; then
17 > echo "# TRUNCATED (!) output of the daily afick run:"
18 > echo "# Output is $loglines lines, truncated to $LINES."
19 > head -$LINES $LOGFILE
20 > echo "# The full output can be found in $LOGFILE."
21 > else
22 > echo "# Output of the daily afick run:"
23 > cat $LOGFILE
24 > fi
```

Рис. 1. Файл конфигурации cron

### 2. Конфигурация afick.conf

Каждая строка содержит параметр с ключевым словом и желаемую настройку, разделенные двоеточием и знаком равенства. AFICK игнорирует все строки, начинающиеся со знака хэша (#) (рис. 2).

Раздел "директивы" в самом начале файла конфигурации определяет несколько основных параметров, включая полный путь к местоположению, в котором AFICK хранит содержимое базы данных. AFICK также запоминает краткие сведения обо всех действиях,

которые пользователь выполнил в истории; подробные отчеты о действиях попадают в архив [3].

В файле конфигурации пользователь указывает, какие метаданные необходимо AFICK отслеживать.

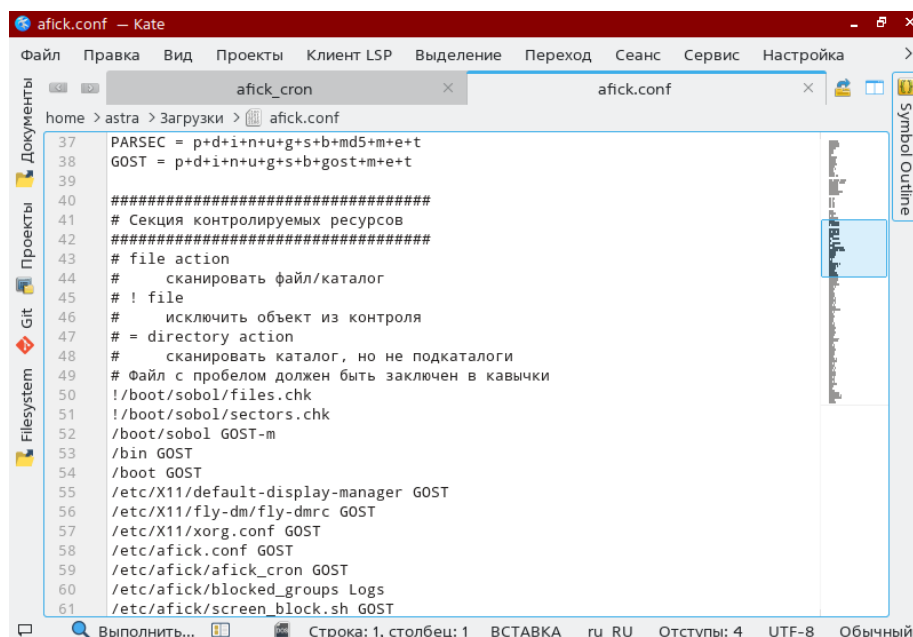


Рис. 2. Файл конфигурации afick

### 3. Структура скрипта

В файле /etc/cron.daily/afick\_cron привели функцию send\_mail к виду:

```
send_mail() {if [[ $(echo "$OUTPUT" | grep "Hash database updated successfully" | cut -f2 -d", " | cut -f1 -d"(") != "0 changed" ]]
```

Если количество измененных файлов не равно 0, то выводится предупреждение о потере целостности файловой системы.

```

for x in $d/X*; do
displaynum=${x#$d/X}
getXuser;
if [ "$x$XAUTHORITY" != x ]; then
> export DISPLAY=":$displaynum"
> if [ -x /usr/bin/fly-wmfunc ]; then
> > su "$XUSER" -s /bin/sh -c "/usr/bin/fly-wmfunc FLYWM_LOCK & /usr/
bin/fly-qmsg -t 'Внимание!' -l 86400000 -i critical 'Нарушена
целостность контролируемых файлов.' '$'\n''Обратитесь к
администратору безопасности.' & /usr/bin/notify-send 'Внимание!'
'Нарушена целостность контролируемых файлов.' '$'\n''Обратитесь к
администратору безопасности.' --icon=dialog-error --expire-
time=60000 &"
#для другого уровня
#для SE 1.5
/usr/bin/find /var/private/tmp -type p -name "fly-wm-*" -exec /
bin/sh -c '/usr/bin/fly-qmsg -t "Внимание!" -l 86400000 -i
critical "Нарушена целостность контролируемых файлов. Обратитесь к
администратору безопасности." & /usr/bin/notify-send "Внимание!"
"Нарушена целостность контролируемых файлов. Обратитесь к
администратору безопасности." --icon=dialog-error --expire-
time=60000 > {}' \;
/usr/bin/find /var/private/tmp -type p -name "fly-wm-*" -exec /
bin/sh -c 'echo FLYWM_LOCK > {}' \;

```

Рис. 3. Часть листинга кода скрипта



Cron файл настроен на круглосуточный мониторинг, в случае несанкционированной модификации избранных файлов, выводится следующее уведомление (рис. 4).

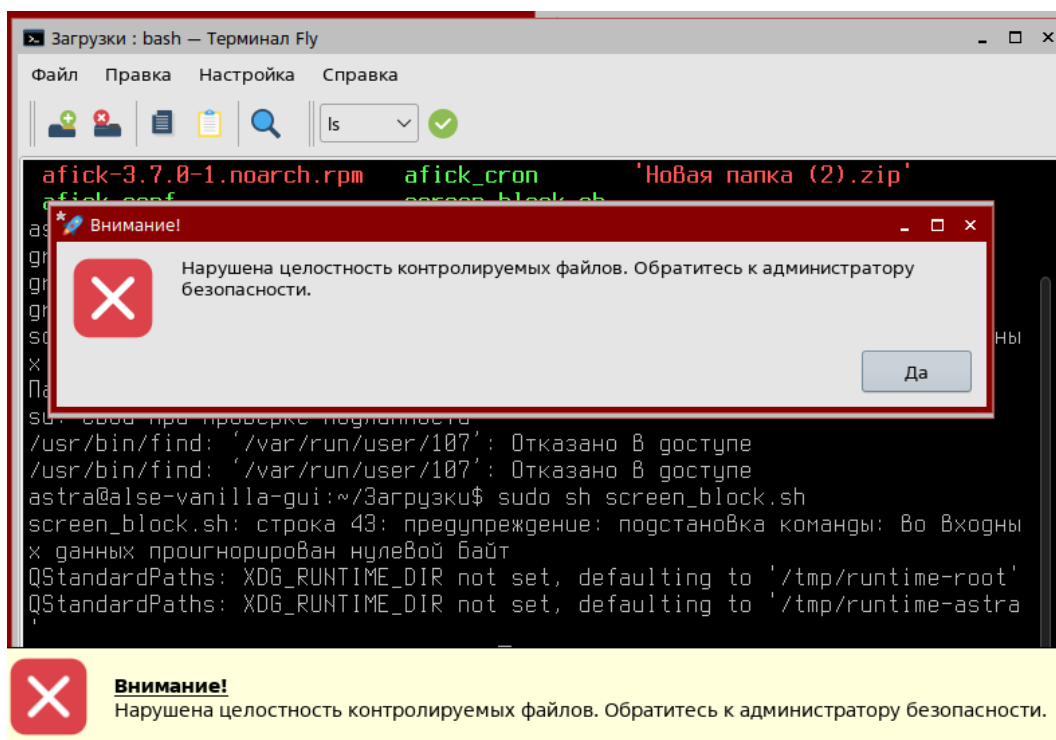


Рис. 4. Уведомление пользователя о несанкционированном изменении файлов

### III. Заключение

Таким образом, предлагаемый подход к выявлению причин блокировки в Astra Linux позволяет определить историю доступа и модификации файловой системы. Единственными инструментами, необходимыми для подобного анализа, являются настроенные файлы конфигурации и небольшой скрипт мониторинга.

Для своевременного обнаружения фактов несанкционированных действий предполагается фиксация и накопление сведений обо всех действиях, содержащих обращения к защищаемым файлам системы. Без эффективной реализации функций контроля целостности системы защиты невозможно достигнуть высокой эффективности функционирования не только подсистемы ОС, но и системы защиты в целом.

### Библиографический список

1. Справочный центр Astra Linux. URL: <https://wiki.astralinux.ru/pages/viewpage.action?pageId=137563438> (дата обращения: 01.04.2022).
2. Видеоподкаст 1. Введение в ОС Astra Linux. 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Ug1cQadP1QI> (дата обращения: 01.04.2022).
3. Руководящие указания по конструированию прикладного программного обеспечения для операционной системы специального назначения «Astra Linux Special Edition». 2018. URL: [https://astralinux.ru/assets/docs/RUK-OSSN-DEV\\_1-6.pdf](https://astralinux.ru/assets/docs/RUK-OSSN-DEV_1-6.pdf) (дата обращения: 01.04.2022).
4. Колисниченко Д. Linux от новичка к профессионалу. 7-е издание. СПб.: «БХВ-Петербург», 2020. 674 с.
5. Омельченко С. В., Виприцкий И. А. Обзор программных средств защиты информации // Инновации в науке. 2013. №19. С. 52-56.



6. Девянин П. Н. Модели безопасности компьютерных систем. Управление доступом и информационными потоками. М.: Горячая линия - Телеком, 2018. 320 с.

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. С. Игнатов, А. Е. Самотуга, 2023

УДК 004.056

*А. С. Кавун*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**Аннотация.** Для обеспечения эффективной защиты информации необходимо разработать модель угроз информационной безопасности, при этом поддерживать ее в актуальном состоянии. В данной работе рассмотрен методический документ ФСТЭК «Методика оценки угроз безопасности информации» для построения модели угроз медицинских информационных систем.

**Ключевые слова:** модель угроз информационной безопасности, медицинская информационная система, персональные данные.

### **I. Введение**

Медицинская информационная система (МИС) относится к объектам критической информационной инфраструктуры, согласно [1], так как обрабатывает биометрические данные граждан и имеет критические процессы, нарушение которых может привести к негативным социальным последствиям. Данные, обрабатываемые в МИС, отличаются высокой конфиденциальностью. Это связано с тем, что граждане имеют право на защиту конфиденциальности данных, передаваемых при обращении к врачу, что закреплено в [2]. Данные, которые обрабатываются и хранятся в МИС, являются персональными и могут составлять врачебную тайну.

По данным компании Positive Technologies доля кибератак на медицинские учреждения в 2022 году составила 9% среди всех организаций, при этом количество атак остается на уровне 2021 года. Главной целью злоумышленников являлись персональные данные пациентов, такие как ФИО, адреса проживания, страховые данные, номера телефонов, реквизиты банковских счетов, истории болезней, данные о состоянии здоровья и др.

В течение последних пяти лет медицинский сектор входит в тройку самых атакуемых отраслей [3], поэтому необходимо особое внимание уделять разработке модели угроз, так как она является основным документом для определения организационных и технических мер по защите информации. Чтобы понять как защищаться, нужно в первую очередь определить от чего или кого необходимо защищаться, какие угрозы являются актуальными для информационной системы (ИС), и к каким последствиям может привести реализация этих угроз.

## **II. Постановка задачи**

Модель угроз безопасности представляет собой документ, необходимый для выявления условий и факторов, которые приводят или могут привести к нарушению безопасности информации, а также нарушению или прекращению функционирования систем и сетей.

В соответствии с [4] в процессе моделирования угроз информационной безопасности (ИБ) необходимо выполнить следующие действия:

1. Составить описание информационной системы.
2. Определить возможные негативные последствия от реализации угроз.
3. Определить возможные объекты воздействия угроз безопасности информации.
4. Оценить способы реализации угроз безопасности информации.
5. Составить перечень актуальных угроз безопасности информации.

Для моделирования рассмотрим локальную информационную систему с разграничением прав доступа, подключенную к сети Интернет. Особенности данной системы заключаются в том, что все сегменты ИС находятся в пределах одного здания, пользователям нельзя использовать мобильные устройства и Wi-Fi, применяются только сертифицированные ФСТЭК или другими регуляторами средства защиты информации.

## **III. Построение модели угроз безопасности**

### **Описание информационной системы**

В описание информационной системы должно быть включено назначение и задачи, которые решаются в МИС. Назначение медицинской информационной системы заключается в автоматизации основных процессов работы медицинской организации, включая учет оказанных медицинских услуг пациентам, автоматическое формирование медицинской документации, составление отчетов о работе больницы и персонала в соответствии с установленными формам, а также обеспечивает пациенту возможность самостоятельной записи на прием, выдачу электронных копий медицинских документов.

Также, в описание ИС необходимо включить адрес расположения технических средств, границы контролируемой зоны, а также описание технических, программных компонентов информационной системы, сведения об обрабатываемой информации, ее правовой режим.

В основном в медицинских информационных системах обрабатывают следующие данные, подлежащие защите:

Информация о пациентах:

- персональные данные;
- информация о факте обращения за медицинской помощью;
- диагноз;
- анамнез;
- информация о ходе лечения;
- стоимость и способы оплаты услуг.

Персональные данные относятся к конфиденциальной информации, защита которой регламентируется в [5], обязанность по защите персональных данных возлагается на оператора – медицинское учреждение, а также на сотрудников учреждения.

Информация о том, что пациент обратился за медицинской помощью, а также его персональные данные, считаются личной тайной и должны быть защищены сотрудниками медицинского учреждения как профессиональная тайна.

Диагноз, анамнез и информация о ходе лечения также являются личной тайной пациента и должны быть защищены как врачебная тайна. Эти данные критически важны для лечения пациента, поэтому необходимо обеспечить их сохранность и защиту от потери и несанкционированного изменения.

Информация о сотрудниках медицинского учреждения, которая также должна защищаться:

- персональные данные;
- кадровая информация.

Законодательство требует, чтобы организации защищали и персональные данные сотрудников. Однако, для медицинских учреждений некоторые данные, необходимые для идентификации врача, должны быть доступны широкому кругу пользователей, например, в расписании.

Кадровая информация, такая как специализация, образование, заработная плата, взыскания и поощрения, является личной тайной сотрудников и служебной информацией, поэтому ее сохранность должна обеспечиваться сотрудниками кадрового отдела.

Также в МИС обрабатывается информация, описывающая АС:

- информации о назначении и общих характеристиках МИС;
- эксплуатационная документация;
- проектной документация МИС;
- справочник пользователей МИС и др.

Данная информация предназначена для служебного использования.

Также необходимо составить перечень категорий пользователей и их права доступа к системе. Пользователями МИС являются сотрудники учреждения строго в соответствии со списком постоянных пользователей МИС, имеющими соответствующие права допуска к ресурсам системы.

Работа в МИС ведется в многопользовательском режиме с разграничением прав доступа, которое обеспечивается за счет идентификации субъектов. Перед предоставлением доступа к системе проводится аутентификация пользователей.

#### **Определение возможных негативных последствий от реализации угроз**

Негативные последствия определяются на основе законодательства, в частности в сфере здравоохранения и защите персональных данных, а также на основе оценки ущерба от нарушения основных процессов.

Так как в МИС основными обрабатываемыми данными являются персональные данные пациентов и защита таких данных регламентирована на законодательном уровне, то одними из возможных негативных последствий будут являться соответственно нарушение конфиденциальности персональных данных и нарушение законодательства Российской Федерации. Неправомерное воздействие на системы и сети может нарушить штатный режим работы систем, невозможности реализации функций системы, а также к отсутствию доступа к государственной услуге, что наносит ущерб государству в социальной сфере деятельности.

#### **Возможные объекты воздействия угроз безопасности информации**

Для определения возможных объектов воздействия нужно выделить информационные ресурсы и компоненты систем, воздействие на которые может привести к негативным последствиям [4].

Для МИС основными группами объектов воздействия будут являться следующие:

- персональные данные;
- базы данных МИС;
- информация для служебного пользования;
- технологическая информация, описывающая АС (конфигурационные файлы, настройки систем защиты, аутентификационная информация);
- программные ресурсы МИС, средства и программные инструменты, используемые для управления ресурсами системы;
- веб-сайт системы МИС (сервер);
- средства защиты информации.

Необходимо выявить возможные виды воздействия на информационные ресурсы, которые могут привести к негативным последствиям, определенным на предыдущем этапе. Так, неправомерный доступ к базам данных, где хранятся персональные данные, может привести к нарушению их конфиденциальности.

#### **Определение условий для реализации угроз безопасности информации**

Для реализации угроз безопасности необходимыми условиями являются наличие уязвимостей и наличие у злоумышленников удаленного, локального или физического доступа к компонентам системы.

Согласно ГОСТ Р 56545-2015 «уязвимость - это недостаток (слабость) программного (программно-технического) средства или информационной системы в целом, который (которая) может быть использована для реализации угроз безопасности информации [6].

Основными причинами появления уязвимостями являются:

1. ошибки допущенные при проектировании и разработке МИС;
2. ошибки допущенные администратором МИС при настройке работы системы;
3. ошибки пользователей МИС, например, несоблюдение политик ИБ, использование слабых паролей и др.

Также уязвимости могут быть в программном обеспечении, в сетевом оборудовании и в средствах защиты информации. Для их устранения чаще всего достаточно устанавливать обновления.

В процессе оценки условий для реализации угроз необходимо выявить типы уязвимостей, которые могут быть использованы злоумышленником, а также определить виды доступа нарушителя к информационным ресурсам.

#### **Определение источников угроз безопасности информации и оценку возможностей нарушителей**

Нарушители делятся на две группы:

1. внешние нарушители – физические лица или преступные группировки, которые не имеют права находиться на территории, где расположена МИС и не имеют прямого доступа к ее ресурсам;
2. внутренние – физические лица, являющиеся работниками медицинского учреждения и имеющие право находиться на территории, в пределах которой размещена МИС.

Сотрудники, которым разрешен доступ к МИС, имеют различные уровни доступа к информационным, программным и аппаратным ресурсам в соответствии с правилами, установленными в учреждении.

К внутренним нарушителям могут относиться:

- системный администратор;
- пользователи МИС;
- сотрудники учреждения, имеющие доступ в служебных целях в помещения, где размещаются ресурсы МИС, но не имеют право доступа к ним;
- обслуживающий персонал;
- физические лица, которые на договорной основе имеют право на обслуживание компонентов МИС.

Внутренние нарушители могут действовать из-за желания получить финансовое вознаграждение при сговоре с преступными группировками или из-за выполнения неосторожных неквалифицированных действий при работе в системе.

Внешние нарушители могут преследовать цель финансовой выгоды после продажи персональных данных пациентов, которые могут содержать сведения о состоянии здоровья и реквизиты банковских счетов. В отдельных случаях их целью может быть желание самореализоваться.

Как внешние, так и внутренние нарушители, могут преследовать цель заработка за счет неправомерного использования ресурсов ИС, например, через майнинг криптовалюты.

При определении возможностей каждого вида нарушителей стоит учитывать, что для перехвата информации по техническим каналам, внешний нарушитель должен обладать средним или высоким потенциалом, но стоимость передаваемой информации недостаточна для их привлечения внимания, поэтому угрозы, исходящие от внешнего нарушителя с высоким и средним потенциалом, можно считать неактуальными. Актуальными следует считать угрозы, исходящие от внешних нарушителей с низким потенциалом, и угрозы от внутренних нарушителей.

#### **Определение сценариев реализации угроз безопасности информации**

Определение возможных сценариев реализации угроз предусматривает установление тактик и техник, которые может применить нарушитель для неправомерного доступа и воздействия на МИС.

В приложении 5 [4] приведена таблица с возможными тактиками и техниками, которую можно использовать при разработке сценариев атак. Реализовать одну угрозу безопасности можно несколькими сценариями, а при моделировании угроз необходимо учитывать их все. Поэтому составление сценариев в табличном виде является наиболее приемлемым способом, так как при разработке сценариев атак в графическом виде увеличивается трудоемкость моделирования угроз.

#### **Оценка актуальности угроз безопасности информации**

В соответствии с [4] для определения актуальности угроз необходимо проанализировать следующие типы данных:

1. перечень угроз безопасности информации, содержащийся в банке данных угроз ФСТЭК ([bdu.fstec.ru](http://bdu.fstec.ru));
2. описания векторов компьютерных атак, представленных в базах данных (OWASP, SARPEC, АТТ&СКи др.);
3. негативные последствия от реализации угроз;
4. объекты воздействия угроз безопасности информации и виды воздействий на них.
5. категории актуальных нарушителей и их возможности;
6. актуальные способы реализации угроз безопасности информации.

В результате должен получиться перечень актуальных угроз информационной безопасности.

Актуальность угрозы определяется наличием нарушителя или другого источника угрозы, объекта воздействия и способов реализации угроз безопасности, которые в совокупности могут привести к негативным последствиям.

### **IV. Заключение**

В соответствии с [7] для рассматриваемого типа МИС можно выделить следующие группы актуальных угроз информационной безопасности:

Постоянные угрозы:

- угрозы BIOS;
- угрозы объектам файловой системы и носителям информации;
- угрозы технических сбояв;
- угрозы вредоносных программ;
- угрозы несанкционированного доступа.

Угрозы, возникающие при эксплуатации МИС:

- угрозы, связанные с подключением к Интернету;
- угрозы, связанные с возможным физическим доступом посторонних лиц.

Описание актуальных угроз должно содержать идентификатор угрозы в соответствии с банком угроз ФСТЭК [8]; наименование угрозы, содержащееся в банке данных; соответствующие способы реализации и возможности нарушителей; возможные сценарии реализации угроз безопасности информации, а также заключение об актуальности угрозы.

Научный руководитель Данилова Ольга Тимофеевна, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ.
2. Постановление Правительства РФ «Основы законодательства Российской Федерации об охране здоровья граждан» от 22.07.1993 №5488-1.
3. Кибербезопасность 2022-2023. Тренды и прогнозы // Positive Technologies URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ogo-kakaya-ib/#id10> (дата обращения: 13.03.2023).
4. Методика оценки угроз безопасности информации. ФСТЭК России. 2021 год. URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskayazashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnyedokumenty/2170-metodicheskij-dokument-utverzhdn-fstekrossii-5-fevralya-2021-g> (дата обращения: 14.03.2023).
5. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 N 152-ФЗ.
6. ГОСТ Р 56545-2015 «Защита информации. Уязвимости информационных систем. Правила описания уязвимостей». Введ. 2016-04-01. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с.
7. Безродных О. А. Систематизация угроз безопасности информации для упрощения построения модели угроз // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». 2021. №4. <https://cyberleninka.ru/article/n/sistematizatsiya-ugroz-bezopasnosti-informatsii-dlya-uproscheniya-postroeniya-modeli-ugroz/viewer> (дата обращения: 14.03.2023).
8. Банк данных угроз безопасности информации. URL: <https://bdu.fstec.ru/threat> (дата обращения: 14.03.2023).

*Дата поступления статьи: 27.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. С. Кавун, 2023

УДК 004.7

*Т. С. Казбеков*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## СРАВНЕНИЕ СЛУЖБЫ КАТАЛОГОВ MICROSOFT ACTIVE DIRECTORY С АНАЛОГАМИ

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные характеристики и возможности четырех систем управления идентификацией пользователей и политиками доступа: Microsoft Active Directory (AD), Astra Linux Directory (ALD), Samba DC и Free IPA. Приводятся сравнительные таблицы по функциональности, производительности, безопасности и совместимости этих систем. Также анализируются преимущества и недостатки каждой из них с точки зрения администрирования, масштабируемости и интеграции с различными операционными системами.

**Ключевые слова:** Microsoft Active Directory, Astra Linux Directory, Samba DC, Free IPA, управление учётными данными, политики доступа.

## I. Введение

В связи с растущей необходимостью перехода для российского рынка с зарубежного продукта, поднимается вопрос в поиске таких решений, которые позволили бы сделать данную процедуру менее трудозатратой и ресурсоемкой.

Системы управления идентификацией пользователей и политиками доступа являются важной частью инфраструктуры любой организации или предприятия. Они позволяют централизованно хранить и управлять учетными записями пользователей и групп, обеспечивать единую аутентификацию и авторизацию на разных ресурсах сети, контролировать доступ к данным и приложениям в соответствии с заданными правилами и ролями.

На рынке существует множество различных систем управления учётными данными и политиками доступа для сетей на базе Linux/Unix или Windows. В данной статье остановимся на четырех из них: Microsoft Active Directory (AD), Astra Linux Directory (ALD), Samba DC и Free IPA.

## II. Теория

Эти системы были выбраны для сравнения по следующим критериям: популярность и функциональность.

Популярность:

Microsoft AD является доминирующей системой в корпоративном секторе для Windows-сетей; ALD — это отечественная разработка для защищенных информационных систем; Samba DC — это свободная реализация AD для Linux/Unix-сетей; Free IPA — это свободный проект для создания централизованной системы по управлению идентификацией пользователей, задания политик доступа и аудита для Linux/Unix-сетей [1].

Функциональность:

Все четыре системы предоставляют базовые функции по управлению пользователями и группами, аутентификации по протоколу Kerberos, хранению данных в LDAP - сервере, поддержке DNS - службы, выдаче сертификатов PKI. Однако они также имеют свои специфические особенности по работе с политиками доступа (GPO, HBAC), перемещаемыми папками (roaming profiles), доверительными отношениями между доменами (trusts), интеграцией с друг другом.

Astra Linux Directory (ALD) — это служба каталогов Astra Linux, которая позволяет компьютерам с ОС Astra Linux выступать в роли клиента домена AD. ALD поддерживает работу с доменами Windows Server 2003 и выше. ALD обеспечивает следующие функции [2]:

- аутентификация и авторизация пользователей и компьютеров в домене AD;
- применение групповых политик безопасности (GPO) к клиентам Astra Linux;
- интеграция с сервисами Kerberos и LDAP.

Samba DC — это свободное программное обеспечение для работы с доменами AD на базе GNU/Linux. Samba позволяет компьютерам с ОС GNU/Linux выступать как в роли контроллера домена AD, так и в роли клиента домена AD. Samba поддерживает работу с доменами Windows Server 2000 и выше. Samba обеспечивает следующие функции:

- создание и управление доменной инфраструктурой на базе GNU/Linux;
- аутентификация и авторизация пользователей и компьютеров в домене AD;
- применение групповых политик безопасности (GPO) к клиентам Windows и GNU/Linux;
- интеграция с сервисами Kerberos, LDAP, DNS, DHCP и NTP;
- поддержка механизма Single Sign-On (SSO);

- репликация данных между контроллерами домена AD;
- бэкап и восстановление данных домена AD.

Free IPA — это свободное программное обеспечение для работы с доменами AD на базе GNU/Linux. Free IPA позволяет компьютерам с ОС GNU/Linux выступать в роли контроллера домена AD. Free IPA поддерживает работу с доменами Windows Server 2008 R2 и выше. Free IPA обеспечивает следующие функции:

- создание и управление доменной инфраструктурой на базе GNU/Linux;
- аутентификация и авторизация пользователей и компьютеров в домене AD;
- применение групповых политик безопасности (GPO) к клиентам Windows и GNU/Linux;
- интеграция с сервисами Kerberos, LDAP, DNS, DHCP и NTP;
- поддержка механизма Single Sign-On (SSO);
- репликация данных между контроллерами домена AD;
- бэкап и восстановление данных домена AD.

### III. Результаты экспериментов

Для сравнения преимуществ и недостатков каждой системы рассмотрим следующие критерии:

- совместимость с Windows и Linux клиентами и серверами: как каждая из систем поддерживает различные версии операционных систем и протоколов;
- сложность установки и настройки: как каждая из систем требует времени и ресурсов для развертывания и конфигурирования;
- гибкость и масштабируемость: как каждая из систем позволяет адаптироваться к изменяющимся потребностям бизнеса и росту сети;
- стоимость владения: как каждая из систем влияет на бюджет организации в течение жизненного цикла.

#### Microsoft Active Directory

Преимущества: высокая совместимость с Windows клиентами и серверами; средняя сложность установки и настройки; высокая гибкость и масштабируемость; широкий спектр функциональности и возможностей для управления доменом. Недостатки: низкая совместимость с Linux клиентами и серверами; высокая стоимость владения; зависимость от ОС Windows Server и клиентских ОС Windows.

#### Astra Linux Directory

Преимущества: средняя совместимость с Windows клиентами и серверами; низкая сложность установки и настройки; средняя гибкость и масштабируемость; низкая стоимость владения; работа под управлением российской ОС Astra Linux. Недостатки: ограниченный спектр функциональности и возможностей по сравнению с AD; необходимость приобретения дополнительных модулей для расширения функционала (ALD Pro); отсутствие официальной документации [2].

#### Samba DC

Преимущества: высокая совместимость с Windows клиентами и серверами; высокая гибкость и масштабируемость; низкая стоимость владения; работа под управлением любой ОС Linux. Недостатки: высокая сложность установки и настройки; не полная эмуляция поведения AD (например, нет поддержки DFS-R); необходимость использования сторонних инструментов для управления доменом (например, RSAT).

#### Free IPA

Преимущества: высокая совместимость с Linux клиентами и серверами; высокая гибкость и масштабируемость; низкая стоимость владения; работа под управлением любой ОС Linux. Недостатки: низкая совместимость с Windows клиентами и серверами; средняя сложность установки и настройки.



Таблица 1

**Сравнение преимуществ и недостатков систем**

Система	Совместимость	Сложность	Гибкость	Стоимость
MS AD	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
ALD	Средняя	Низкая	Средняя	Низкая
Samba DC	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Free IPA	Низкая	Низкая	Высокая	Низкая

Затронем уровень безопасности коммуникаций и данных:

Уровень безопасности коммуникаций и данных — это степень защиты данных пользователей и ресурсов сети от несанкционированного доступа, взлома или утечки. Для оценки уровня безопасности мы использовали различные методы тестирования на проникновение, такие как сканирование портов.

Таблица 2

**Сравнение уровня безопасности коммуникаций и данных**

Параметр	MS AD	ALD	Samba DC	Free IPA
Шифрование коммуникаций	Да	Средняя	Низкая	Высокая
Аутентификация по Kerberos	Да	Низкая	Средняя	Низкая
Целостность данных по HMAC	Да	Высокая	Высокая	Низкая
Сканирование портов (количество открытых портов)	10 (53, 88, 135, 139, 389, 445, 464, 636, 3268, 3269)	4 (53, 88, 389, 636)	9 (53, 88, 135, 139, 389, 445, 464, 636, 3268)	7 (53, 80, 88, 389, 443, 464)

Из результатов тестов мы можем сделать следующие выводы:

- Microsoft AD имеет самый высокий уровень безопасности коммуникаций и данных среди всех систем. Он использует различные методы шифрования, аутентификации и целостности для защиты своих пользователей и ресурсов;
- ALD имеет самый низкий уровень безопасности коммуникаций и данных среди всех систем. Он не использует никаких методов шифрования, аутентификации или целостности для защиты своих пользователей или ресурсов;
- Samba DC и Free IPA имеют средний уровень безопасности коммуникаций и данных. Они используют некоторые методы шифрования.

**IV. Заключение**

В результате выполнения работы были предоставлены оценочные данные для выбранных критериев сравнения представленных служб каталогов.

Нет однозначного ответа на вопрос, какая система лучше. Выбор системы зависит от многих факторов, таких как размер и структура используемой сети, типы и версии используемых ОС, требования к безопасности и производительности, бюджет и т.д.

Каждая система имеет свои преимущества и недостатки, которые нужно учитывать при принятии решения. Специалисту необходимо сравнивать системы по тем критериям,

которые важны для конкретного случая, и выбирать ту систему, которая лучше удовлетворяет потребностям и ожиданиям.

Каждая система требует определенных знаний и навыков для установки, настройки и управления. Вы должны быть готовы изучать документацию, обращаться к специалистам или сообществу за помощью или обучением по каждой системе.

Научный руководитель: Литвинов Георгий Александрович, Омский государственный технический университет.

### **Библиографический список**

1. Microsoft Corporation. Active Directory Domain Services Overview. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/identity/ad-ds/get-started/virtual-dc/active-directory-domain-services-overview> (дата обращения: 10.03.2023).
2. Astra Linux Group. Astra Linux Directory. URL: <https://astralinux.ru/products/astra-linux-directory/> (дата обращения: 10.03.2023).
3. Kumar R. OpenLDAP Migration Tutorial [Step-by-Step] // GoLinuxCloud - 2020. URL: <https://www.golinuxcloud.com/openldap-migration-examples/> (дата обращения: 10.03.2023).
4. Samba Team. Настройка Samba в качестве контроллера домена Active Directory // Samba Team. Samba Wiki. URL: [https://wiki.samba.org/index.php/Setting\\_up\\_Samba\\_as\\_an\\_Active\\_Directory\\_Domain\\_Controller](https://wiki.samba.org/index.php/Setting_up_Samba_as_an_Active_Directory_Domain_Controller) (дата обращения: 10.03.2023).
5. Уоллен Д. Развёртывание Samba на Linux в качестве контроллера домена ActiveDirectory // Джек Уоллен (Jack Wallen). TechRepublic. 2018. URL: <https://www.techrepublic.com/article/how-to-deploy-samba-on-linux-as-an-active-directory-domain-controller/> (дата обращения: 10.03.2023).

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Т. С. Казбеков, 2023

УДК 004.932.2

*А. А. Косов, В. Ю. Малий*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### **СТЕГАНОГРАФИЯ.**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА КОХА–ЖАО НА ИЗОБРАЖЕНИЕ**

**Аннотация.** В статье рассматривается такой способ хранения и передачи информации как стеганография, а конкретно метод Коха – Жао, который использует частотную область контейнера и заключается в относительной замене величин коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП). Исследуется влияние этого метода на изображение путем встраивания сообщений разной длины и изменения разности коэффициентов ДКП.

**Ключевые слова:** стеганография, метод Коха–Жао, дискретное косинусное преобразование, расстояние Минковского, Рунтон.

## I. Введение

Проблема безопасного хранения и передачи конфиденциальной информации является актуальной в нынешнюю эпоху информационных технологий. Обезопасить передачу конфиденциальной информации позволяет стеганография, которая, в отличие от криптографии, не использует изменения в структуре сообщения, а скрывает сам факт передачи информации. Стеганография является относительно легко осуществимым и довольно эффективным способом скрытого обмена информацией.

## II. Постановка задачи

Метод Коха – Жао один из наиболее распространенных на сегодняшний день методов скрытия конфиденциальной информации, поэтому целью данной работы является изучение этого метода и исследование его влияния на изображение.

## III. Описание метода и исследование

Алгоритм Коха – Жао для встраивания информации использует частотную область контейнера и заключается в относительной замене величин коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП). Как правило, изображение разбивается на блоки размерностью  $8 \times 8$  (также возможны  $4 \times 4$  и  $2 \times 2$ ) пикселей и к каждому блоку применяется ДКП. Каждый блок пригоден для записи одного бита информации [1]. Для исследования рассматривалось 100 изображений размером  $640 \times 480$  и текстовый файл, содержащий встраиваемое сообщение. В ходе исследования были рассмотрены зависимости расстояния Минковского между исходным и изменённым изображениями от объёма скрываемого сообщения, а также от разности коэффициентов ДКП. Для вычисления расстояния Минковского была разработана программа на языке программирования Python. Для встраивания сообщения в частотную область изображения было использовано приложение INFINPIC [3].

Для составления графиков зависимости была выбрана разность коэффициентов 25, объём встраиваемого сообщения каждый раз изменялся, также был рассмотрен случай, когда объём стегоконтейнера был использован полностью. При построении графиков было использовано среднее значение расстояния Минковского для одного объёма встраиваемой информации в 100 изображений. Полученные графики при встраивании в блоки  $8 \times 8$ ,  $4 \times 4$  и  $2 \times 2$  изображены соответственно на рис. 1, 2 и 3.

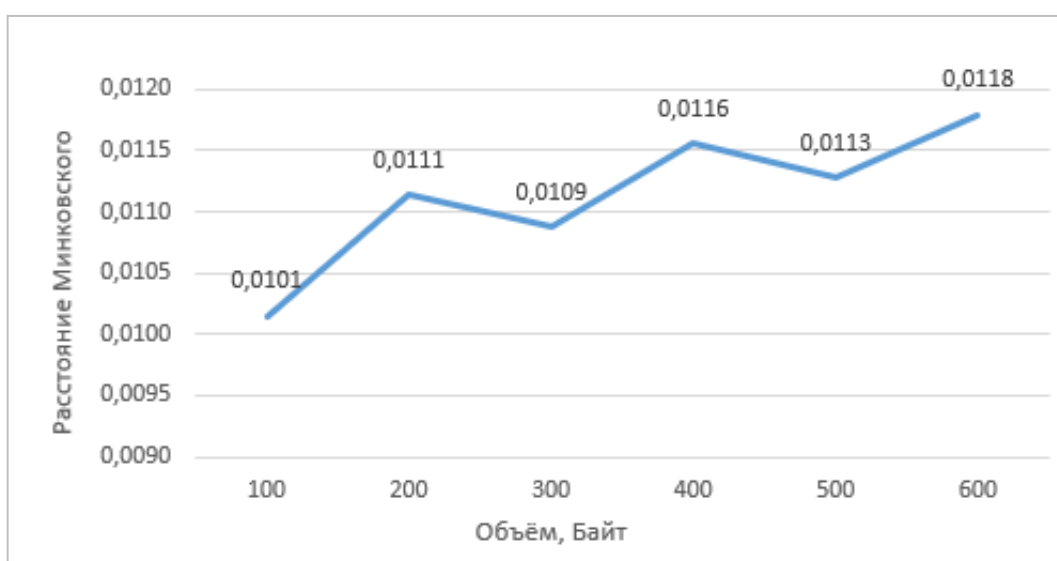


Рис. 1. График зависимости расстояния Минковского от объёма встраиваемого сообщения размером от 100 до 600 Байт при использовании блоков  $8 \times 8$

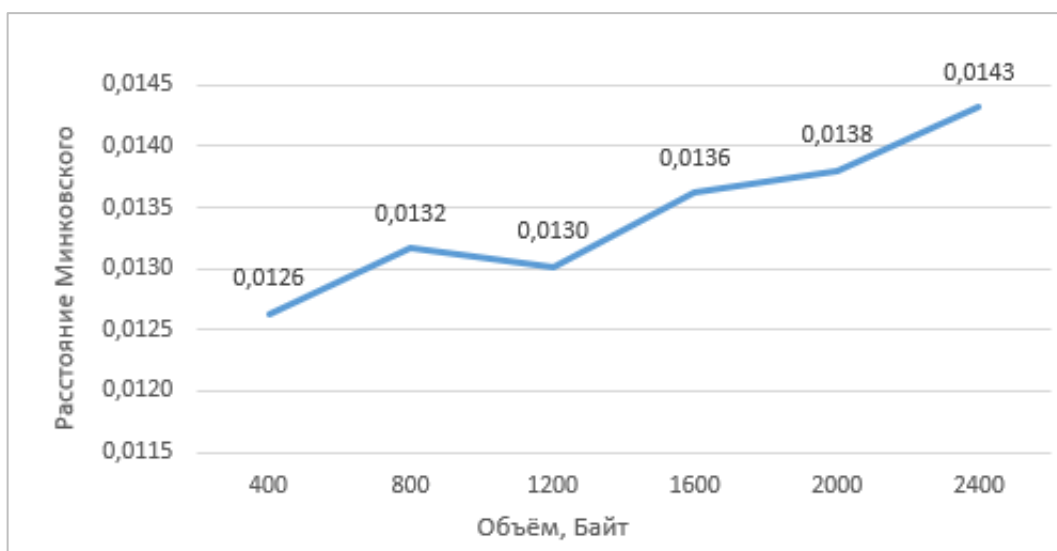


Рис. 2. График зависимости расстояния Минковского от объёма встраиваемого сообщения размером от 400 до 2400 Байт при использовании блоков 4×4

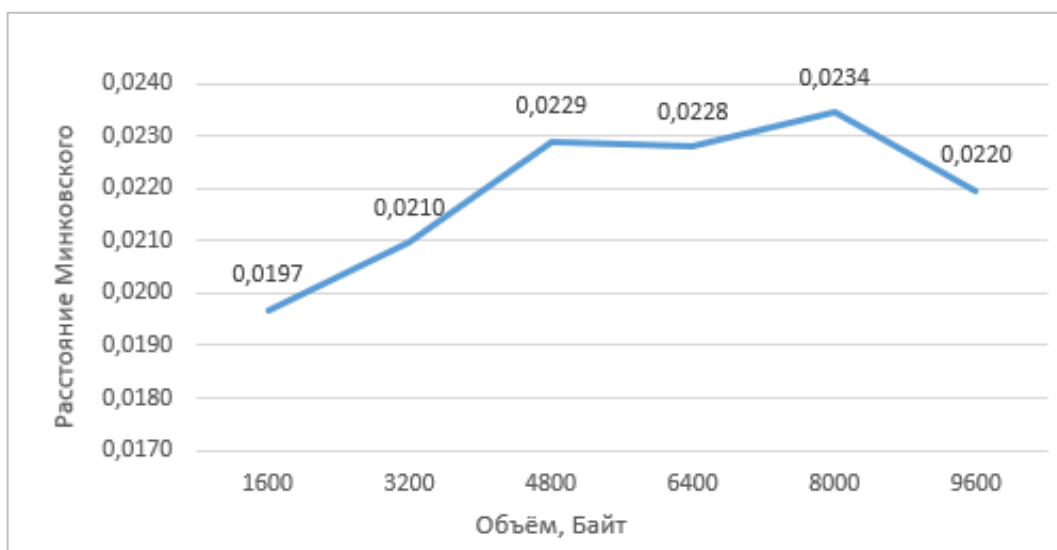


Рис. 3. График зависимости расстояния Минковского от объёма встраиваемого сообщения размером от 1600 до 9600 Байт при использовании блоков 2×2

По полученным графикам можно сделать вывод о том, что отличия пикселей исходного изображения от изменённого не имеют определённой зависимости от объёма встраиваемого сообщения. Так в отличие от метода наименее значащего бита метод Коха – Жао не будет сильно искажать изображение при встраивании максимально возможного объёма данных в стегоконтейнер. Стоит отметить, что при использовании блоков 8×8 и 4×4 можно проследить некоторое увеличение расстояния Минковского при увеличении объёма скрываемого сообщения.

Визуальные изменения изображений начинают прослеживаться только при изменении блока встраивания это также можно проследить по среднему расстоянию Минковского:

- для блока 8×8 – 0,0111;
- для блока 4×4 – 0,0134;
- для блока 2×2 – 0,0220.

Также было рассмотрено влияние изменения разности коэффициентов ДКП на расстояние Минковского между изображениями. График зависимости представлен на рис. 4.

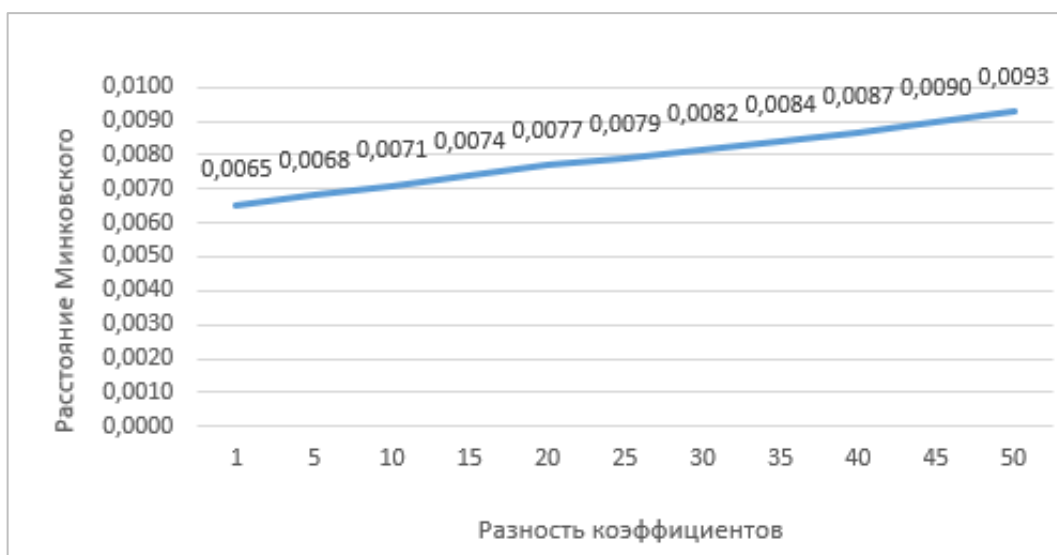


Рис. 4. График зависимости расстояния Минковского от разности коэффициентов значениями от 1 до 50

По данной диаграмме сделан вывод о том, что изменение разности коэффициентов также влияет на расстояние Минковского – чем больше разница коэффициентов, тем больше расстояние.

#### IV. Заключение

В работе описан метод Коха – Жао для встраивания информации в частотную область стегоконтейнера. Было проведено исследование влияние метода Коха – Жао на изображение-контейнер, а именно рассмотрена зависимость расстояния Минковского между исходным и изменённым изображениями от объёма встраиваемой информации, а также от изменения разности коэффициентов ДКП.

Научный руководитель: Белим Сергей Викторович, Омский государственный технический университет.

#### Библиографический список

1. Белим С. В., Вильховский Д. Э. Стеганоанализ алгоритма Коха–Жао // Математические структуры и моделирование. 2018. № 4(48). С. 113–119.
2. Ражков А. Ф. Программное обеспечение для сокрытия информации в цифровых изображениях с помощью стеганографического метода Коха и Жао // Новые горизонты – 2018. Т. 1. С. 138–140.
3. Журба М. INFINPIC. URL: <https://github.com/MariaKrepko/INFINPIC> (дата обращения: 10.03.2023).

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Косов, В. Ю. Малий, 2023

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО МАКЕТА-ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАССЛЕДОВАНИЮ ИНЦИДЕНТОВ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности проектирования цифрового макета-тренажера, выделены и рассмотрены основные этапы проектирования. Дана классификация видам платформ, определены методы организации доступа и разъяснены требования к серверной части.

**Ключевые слова:** цифровой макет, проектирование, дистанционное обучение, импортозамещение

### **I. Введение**

Цифровизация всех отраслей общества привела к тому, что на каждом этапе жизнедеятельности человека цифровые технологии занимают всё большую её часть. В связи с этим особую важность приобретает использование всех её значимых преимуществ, одним из которых является технологий дистанционного обучения для повышения его доступности. Также стоит отметить, что в реалиях современного времени и текущей политической обстановки вводятся различные ограничения, перекрывающие доступ к различным материалам, ресурсам и программному обеспечению. В связи с этим стоит направить свое внимание на возможность импортозамещения вышеперечисленного отечественными аналогами.

Целью данной статьи является раскрытие особенностей проектирования цифрового макета-тренажера (далее – макета), а также один из возможных вариантов его реализации.

### **II. Этапы проектирования**

Основной и главной задачей перед началом построения макета является определение этапов его проектирования. Каждый из указанных далее моментов – неотъемлемая часть процесса построения и не может игнорироваться и замещаться. Ниже наглядно представлена схема данных этапов.



Рис. 1. Этапы проектирования макета

### III. Определение вида платформы

Первым этапом построения макета является определение вида платформы. Под определением вида платформы понимается факт выбора того, что мы в итоге хотим получить. Подразделить их можно на следующие виды: информационный ресурс и тренировочная платформа.

Информационный ресурс представляет собой собрание всевозможных обучающих материалов с разъяснением по ряду тем и практическими примерами. Является самой простой реализацией дистанционного обучения. Преимуществами информационного ресурса, в отличие от других видов являются массовая доступность и низкая требовательность к ресурсам сервера, так как это можно назвать электронной библиотекой. Из недостатков стоит отметить фактическое отсутствие обратной связи, то есть подтвердить правильность освоения материала не представляется возможным. В пример реализации можно привести отечественный ресурс securitylab.ru. На нем представлен широкий выбор различных публикаций от обучающих до просто информационных по теме кибербезопасности. Пример страницы данного ресурса представлен на рис. 2 [1].

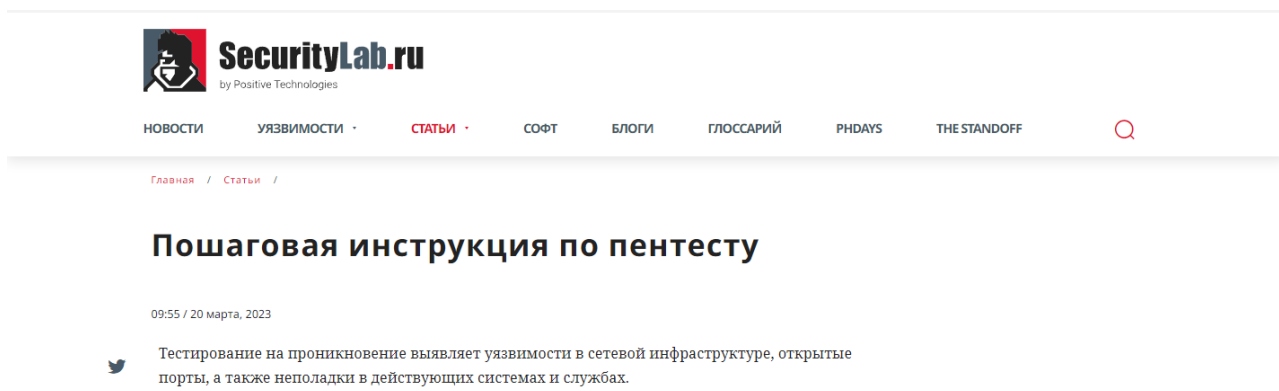


Рис. 2. Пример обучающей статьи (securitylab.ru)

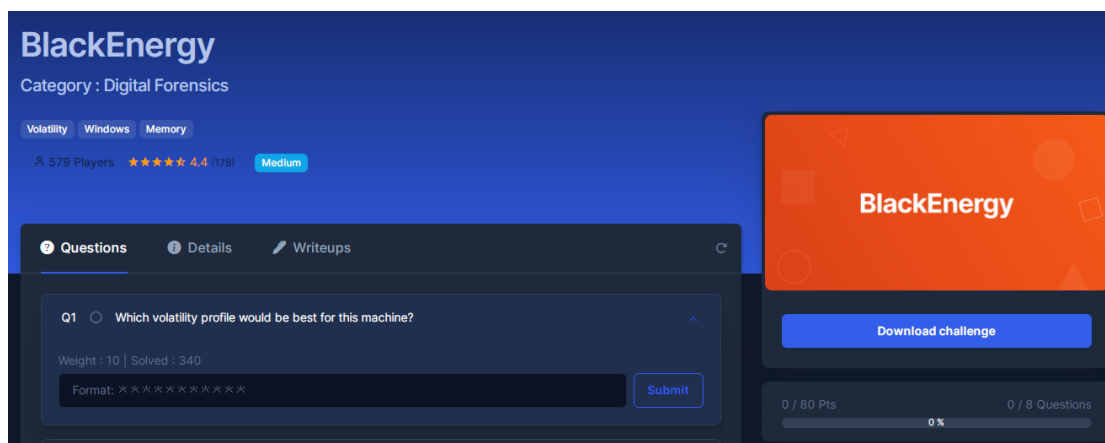


Рис.3. Пример задания (cyberdefenders.org)

Тренировочная платформа – собрание заданий на разные темы (исследование образов дисков, дампов памяти, сетевого трафика и так далее), к которым помимо материалов прилагается ряд вопросов, на которые необходимо ответить, а также предложенным рядом инструментов для проведения исследования. Из преимуществ стоит отметить наличие возможности внедрения обратной связи, в виде пояснений по каждому из вопросов, стоящих перед обучаемым. Весомым же минусом представляется требовательность к ресурсам сервера, так и требовательность к ресурсам системы обучаемого (чего можно избежать полной виртуализацией в рамках сервера), в частности – к объему свободного дискового

пространства, так как приведённый выше список тем подразумевает под собой большой объем материалов (от мегабайта до сотен гигабайт). Пример – ресурс cyberdefenders.org. На нем представлен ряд заданий по темам кибербезопасности, в частности, расследование инцидентов.

На рис. 3 продемонстрирован типовой пример задания с cyberdefenders [2].

#### IV. Организация доступа

Определившись с выбором платформы, необходимо решить, каким образом будет организован доступ к ней. На данном этапе определим два основных типа организации доступа: через интранет и через интернет.

Организация доступа через интранет изолирует платформу в рамки учреждения. Данный метод может использоваться с одной главной целью – снижение нагрузки на компьютеры, которые зачастую не обладают необходимой производительностью и объемом дисковой памяти. Размещение же материалов в рамках сервера позволяет обойти этот недостаток.

Организация доступа через интернет позволяет разместить платформу вне рамок организации и позволяет обучаемым, не имеющим возможность физически присутствовать на занятиях, получить доступ к образовательным материалам и тестовым заданиям.

#### V. Серверная часть

Определив тип платформы и способ организации доступа можно приступить к завершающему этапу – серверной части. Условия для функционирования всех типов платформ разные. Далее рассмотрим их подробнее.

Информационный ресурс – самый нетребовательный к серверной части вид платформы. Для его функционирования будет достаточно минимума ресурсов. По части программного обеспечения же необходим какой-либо веб сервер (например, nginx), выбор операционной системы не принципиален, так как в данном случае ни на что не влияет.

Тренировочная платформа – уже потребует заметно больше ресурсов. Ее серверную часть можно разделить на два основных вида: платформа для доступа и платформа для работы.

Платформа для доступа отличается от информационного ресурса повышенными требованиями к объему дисковой памяти (объем образа диска может достигать сотен гигабайт).

Платформа для работы представляет из себя машину с размещенными на ней материалами и инструментами для их исследования. Это позволяет обучающимся, которые не располагают необходимой мощности системой наравне с остальными проходить программу обучения. Исходя из вышесказанного требования к функционированию серьезно меняются – выбор операционной системы влияет на доступный выбор инструментов, а также встает проблема установки гипервизора на серверную машину, для обеспечения как минимум доступа к разным наборам инструментов, а как максимум множественного одновременного доступа.

Таблица 1

**Требования к оперативной и дисковой памяти**

Платформа	Оперативная память	Дисковая память
Информационный ресурс	минимум 256 мегабайт для ОС + минимум 30 мегабайт на одного пользователя	не менее 5 гигабайт для операционной системы + объем памяти для материала



Тренировочная платформа		
Платформа для доступа	минимум 256 мегабайт для ОС + минимум 30 мегабайт на одного пользователя	не менее 5 гигабайт для операционной системы + объем памяти для материалов
Платформа	Оперативная память	Дисковая память
Платформа для работы	минимум 4 гигабайта для гипервизора + от 4 гигабайта для каждой запущенной машины	не менее 32 гигабайта + объем памяти для материалов

## VI. Заключение

В нынешних обстоятельствах и с учетом ошибок, допущенных во время изоляции и всемирного карантина, внедрение цифровых макетов является закономерной реакцией на устранение допущенных недочетов. Также стоит отметить, что в настоящее время, для решения большинства перечисленных выше моментов вполне можно обойтись использованием отечественных разработок. Наличие подобных обучающих платформ способствует улучшению качества образования, реализует возможность импортозамещения и благоприятно сказывается на дальнейшем развитии будущих специалистов, а также помогает развитию и увеличению количества отечественных решений в данном вопросе.

Научный руководитель: Данилова Ольга Тимофеевна, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Информационный портал по безопасности SecurityLab.ru. URL: <https://www.securitylab.ru/> (дата обращения: 18.03.2023).
2. Cyber Defenders is a blue team training platform. URL: <https://cyberdefenders.org/> (дата обращения: 18.03.2023).
3. Абрамян Г. В., Катасонова Г. Р. Особенности организации дистанционного образования в вузах в условиях самоизоляции граждан при вирусной пандемии // Современные проблемы науки и образования. 2020. №3. С. 41.
4. Жильцов Н. А., Чердаков О. И. Об образовательной платформе, онлайн-курсах и дистанционных технологиях // Юридическое образование и наука. 2020. №. 7. С. 25.
5. Титов Е. К. Образовательные порталы как развитие сетевого образовательного пространства // Образовательные ресурсы и технологии. 2020. №. 2 (31). С. 7-15.
6. Польшакова Н. В., Александрова Е. В. Инновационные технологии обучения, как составляющая виртуальной образовательной среды в системе высшего образования // Реальный сектор экономики: проблемы и перспективы развития. 2019. С. 328-334.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© И.В. Лопаткин, 2023

## **РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОДХОДА К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПЕРИМЕТРА СЕТИ С ПОМОЩЬЮ INFOWATCH ARMA**

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки стенда для объективной оценки результатов исследований и формулирования правил информационной безопасности для обеспечения информационной безопасности. В результате были реализованы рекомендации, необходимые для внедрения комплекса Info Watch ARMA.

**Ключевые слова:** периметр сети, средства защиты, безопасность, информационная безопасность, InfoWatch ARMA.

### **I. Введение**

Одним из основных понятий в информационной безопасности (ИБ) считается понятие сетевого периметра. В современной среде сетевой периметр определяет границу между внутренними и внешними сетями, а также границу инфраструктуры, критически важной для жизнедеятельности организации. К таким критическим элементам можно отнести почтовые серверы, серверы баз данных, внешние носители информации внутренних систем и т.д.

При таком подходе периметр сети защищается как от внутренних, так и от внешних угроз. Чтобы соответствовать этим требованиям, ИТ-индустрия выпускает все больше инструментов для решения этих задач. Эти инструменты часто не имеют ни обратной, ни прямой совместимости. В результате разные инструменты дублируют функциональность других, а некоторые из них могут оказаться ненужными в представленной информационной среде.

Стандарты ИБ также призваны обеспечить четкий набор критериев, которым можно следовать для минимизации потенциальных угроз.

### **II. Постановка задачи**

Целью является исследование универсального подхода по обеспечению ИБ периметра сети организации при помощи отечественной системы InfoWatch ARMA.

Задачей является практическая реализация представленного метода для обеспечения безопасности сети с использованием программного комплекса InfoWatch ARMA, его основные компоненты представлены ниже:

- InfoWatch ARMA Management Console – единый центр управления решениями InfoWatch ARMA и реагирования на инциденты;
- InfoWatch ARMA Industrial Endpoint – решение по защите рабочих станций и серверов SCADA, которое обеспечивает замкнутую защищенную среду за счет обеспечения контроля целостности, запуску ПО по белому списку, контролю подключения съемных носителей, антивирусной защите;
- InfoWatch ARMA Industrial Firewall – промышленный межсетевой экран нового поколения с системой обнаружения вторжений (IDS/IPS) и VPN, обеспечивающее предотвращение угроз для критически важных инфраструктур и промышленных систем управления. Имеет возможность экспорта событий информационной безопасности (ИБ) в SIEM/SOC, также он имеет сертификат ФСТЭК.

### III. Теория

Рассмотрим, с помощью каких стандартов и нормативных документов можно обеспечить безопасность периметра сети организации.

Одним из стандартов, на который необходимо обратить внимание является «ГОСТ Р 59547-2021 Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения» [1].

Процесс мониторинга ИБ включает анализ результатов регистрации инцидентов безопасности и других данных мониторинга:

- анализ инцидентов безопасности и других данных мониторинга;
- мониторинг (анализ) ИБ;
- анализ и оценка функционирования систем защиты информации в информационных системах (ИС);
- периодический анализ изменений угроз ИБ в ИС, произошедших в процессе ее эксплуатации.

Для мониторинга безопасности информации могут быть использованы соответствующие автоматизированные средства.

Мониторинг ИБ также должен включать информацию об инцидентах безопасности, зарегистрированных из различных источников, таких как средства информационной безопасности, программное и аппаратное обеспечение, информационные сервисы, операционная среда ИС, сотрудники (персонал) оператора ИС, другие источники данных и иные данные, необходимые для мониторинга ИБ.

Следующим стандартом, который стоит упомянуть является «ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности (Переиздание)» [2].

Структурированный подход к управлению инцидентами ИБ должен использоваться в качестве основы для общей стратегии ИБ организации. Цель этого подхода - обеспечить выполнение следующих условий:

- инциденты ИБ выявляются и эффективно решаются;
- выявленные инциденты ИБ должны быть оценены, а ответные меры должны быть реализованы наиболее подходящим и эффективным образом;
- влияние инцидентов ИБ на организацию и ее деятельность должно быть минимизировано путем принятия соответствующих защитных мер в рамках процесса реагирования на инцидент;
- необходимо быстро извлекать уроки из инцидентов ИБ и управлять ими.

Для достижения поставленных целей менеджмент инцидентов ИБ подразделяют на четыре отдельных этапа:

- 1) планирование и подготовка;
- 2) использование;
- 3) анализ;
- 4) улучшение.

Данные этапы менеджмента инцидентов ИБ аналогичны процессам модели PDCA, используемой в международных стандартах ИСО 9000 и ИСО 14000.

#### ***Этап «Планирование и подготовка»***

Чтобы эффективно реагировать на инциденты ИБ, необходимо:

- разработать и задокументировать политику управления инцидентами ИБ;
- полностью разработать и задокументировать систему управления инцидентами ИБ для поддержки политики управления инцидентами ИБ;
- обновить политику ИБ и управления рисками на всех уровнях;
- создать соответствующую функцию управления инцидентами ИБ в организации;

- информировать всех сотрудников организации, посредством брифингов и/или других средств, о существовании системы управления инцидентами ИБ, ее преимуществах и о том, каким образом следует сообщать об инцидентах ИБ;

- всестороннее тестирование системы управления инцидентами ИБ.

#### ***Этап «Использование системы менеджмента инцидентов ИБ»***

При использовании системы управления инцидентами ИБ должны быть реализованы следующие процедуры:

- обнаружение и уведомление об инцидентах ИБ;  
- сбор и оценка информации, связанной с инцидентами ИБ;  
- реагирование на инциденты ИБ (немедленное, в режиме реального или почти реального времени);

- принятие менее срочных мер, если инцидент ИБ можно контролировать;  
- если инцидент ИБ не поддается контролю, предпринять действия «кризисного реагирования»;

- сообщить о существовании инцидента ИБ и связанных с ним деталях персоналу собственной организации и персоналу внешних организаций;

- провести юридическую экспертизу;  
- надлежащим образом зафиксировать все действия и решения для последующего анализа;

- разрешение проблемы инцидентов.

#### ***Этап «Анализ»***

После того как инцидент ИБ был разрешен/закрыт, необходимо предпринять следующие действия для обеспечения статуса ИБ:

- при необходимости провести дальнейшую проверку благонадежности;  
- проанализировать уроки, извлеченные из инцидента ИБ;  
- выявить улучшения в реализации мер защиты ИБ, вытекающие из извлеченных уроков;  
- определить улучшения в общей системе управления инцидентами ИБ на основе извлеченных уроков.

#### ***Этап «Улучшение»***

Этап «Улучшение» включает в себя:

- обзор результатов существующего анализа рисков ИБ и анализа средств контроля организации;

- совершенствование системы управления инцидентами ИБ и ее документации;  
- инициирование улучшений безопасности, включая внедрение новых и/или обновленных мер защиты ИБ.

Немного о самой системе защиты:

InfoWatch ARMA – это программный комплекс кибербезопасности для автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Система защищает критическую информационную инфраструктуру от угроз, исходящих от сочетания ИТ- и ОТ-цепей, а также от внутренних и внешних злоумышленников. Все компоненты InfoWatch ARMA интегрированы друг с другом, поэтому систему можно легко масштабировать по мере необходимости.

Помогает решить следующие задачи:

- блокировка атак на сетевом уровне и уровне конечных станций;  
- создание замкнутой безопасной среды;  
- снижение ресурсов на мониторинг;  
- защита от таргетированных (APT) атак.

Позволяет выполнить до 90% технических мер ФСТЭК России (Приказ №239).

Решение позволяет тонко настраивать информационные потоки с помощью технологии глубокого анализа трафика.

#### **IV. Результаты экспериментов**

*Контрольный список мер по обеспечению защиты сетей.*

1. Выполните инвентаризацию устройств. (Анализ и детальный разбор конфигураций и настроек устройств).
2. Выполните инвентаризацию служб и сервисов. (Неиспользуемые службы и службы, которые необходимо отключить).
3. Проверьте доступность интернета на конечных устройствах.
4. Обновить схему сети. (Схема должна быть достаточно подробной, чтобы сотрудники могли понять, какие конечные устройства куда и с какой целью подключены).
5. Сегментировать сеть. (Корпоративная сеть, сеть АСУТП, сеть для видеокамер, сеть для принтеров, сеть для ACS и т.д. должны быть разделены на различные подсети).
6. Создайте проект по реализации функции информационной безопасности. (Инциденты безопасности должны управляться централизованно (например, SIEM). Если ваша компания подпадает под требования № 187-ФЗ и т.д., в проекте должны быть рассмотрены соответствующие требования и меры).
7. Обеспечьте внедрение СЗИ, этот шаг может быть выполнен поэтапно. (Установить и настроить СЗИ в конце генерирующей сети. Установить защищенное удаленное соединение для управления промышленными протоколами и программируемыми логическими контроллерами, например, для управления, внедрения СЗИ в АСУТП).

#### **V. Обсуждение результатов**

*Какие важные моменты необходимо учесть при настройке сетевого оборудования?*

- Отключите неиспользуемые порты на сетевом оборудовании и поместите их в отдельную виртуальную локальную сеть.
- Убедитесь, что удаленный доступ извне (если это абсолютно необходимо) возможен только с использованием VPN и аутентификации.
- Ограничьте доступ к сетевым портам и разрешите использование определенных устройств (самый простой способ – по MAC-адресу).
- Используйте SNMPv3.
- Установите таймаут сессии.
- Включите регистрацию событий.
- Отключите Telnet для администрирования, ограничьте адреса управления и настройте SSH.
- Отключите неиспользуемые службы (например, dhcpd, http-сервер).

*Какие важные моменты необходимо учесть при настройке межсетевых экранов?*

- Основная конфигурация: создайте «белый список» – запретите то, что явно не разрешено.
- Используйте DPI для отключения неиспользуемых протоколов.
- Блокируйте возврат данных из сети системы управления в корпоративную сеть. Все передачи должны завершаться в DMZ. Рекомендуется убедиться, что протоколы, разрешенные между сетью системы управления и DMZ, также не разрешены между DMZ и корпоративной сетью.
- Убедитесь, что все правила лицензирования имеют конкретные IP-адреса и номера портов TCP/UDP и ограничивают трафик конкретными IP-адресами или диапазонами адресов. Трафик должен иметь конкретного получателя, который описывается его источником и указывает службу и сетевой порт, который будет использоваться.
- Убедитесь, что сеть системы управления не подключена напрямую к Интернету (даже через канал связи, защищенный с помощью МЭ).

## VI. Заключение

Содержание политики безопасности.

Политика безопасности является документом «высокого уровня» и должна определять следующее:

- кто несет ответственность за безопасную работу компании;
- обязанности и ответственность отделов и служб в отношении безопасности;
- организация в плане допуска к работе и прекращения трудовых отношений;
- правила, регулирующие доступ сотрудников к информационным ресурсам;
- организация контроля доступа, регистрации сотрудников и посетителей;
- использование программных и аппаратных средств защиты;
- другие общие требования.

Таким образом, политика безопасности является одновременно юридическим и техническим документом. Политика безопасности всегда должна основываться на принципах разумной компетентности и здравого смысла.

Научный руководитель: Трапезников Евгений Валерьевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. ГОСТ Р 59547-2021. Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180385>.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности (Переиздание). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068822>.
3. Техническое описание линейки продуктов InfoWatch ARMA. версия 17 ред. от 23.11.2022». URL: [https://www.infowatch.ru/sites/default/files/material\\_arma/tekhnicheskoe-opisanie-lineyki-produktov-infowatch-arma-ver\\_16.pdf](https://www.infowatch.ru/sites/default/files/material_arma/tekhnicheskoe-opisanie-lineyki-produktov-infowatch-arma-ver_16.pdf).

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Маслова 2023

УДК 004.45

*А. А. Набатова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ОБЗОР ИНЦИДЕНТОВ, СВЯЗАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ЗА 2021-2022 ГОДЫ

**Аннотация.** В статье приведен анализ отчетов «Лаборатории Касперского», Dr. Web и компании «Positive Technologies». В отчетах приведена информация о различных инцидентах и кибератаках, произошедших в 2021 и 2022 годах. Проанализированы инциденты, связанные только с применением вредоносного программного обеспечения (ВПО). Показана

доля их атак на частные лица и организации от прочих инцидентов. Приведен подробный анализ за 2021 и 2022 годы, включая долю конкретных типов ВПО.

**Ключевые слова:** инцидент, вредоносное программное обеспечение, статистика, киберугрозы, кибератаки.

## I. Введение

В современном мире большинство людей имеют при себе по крайней мере одно электронное вычислительное устройство, которое имеет подключение к Интернету. Интернет начинает оказывать влияние на повседневную жизнь. Помимо компьютеров и мобильных устройств, традиционно автономное оборудование и девайсы слишком часто подключаются к Интернету, чтобы сделать их интеллектуальными. Критическая инфраструктура городов, здравоохранения и других отраслей промышленности также была подключена к Интернету, чтобы сделать ее умнее.

Развитие интернета помогает облегчить человеческую жизнь. Но в то же время, вместе с этим растет и количество вредоносных программ и, соответственно, киберпреступлений.

В то время как компьютеры прошлого были объектами вредоносного ПО, в настоящее время, они являются оружием, которым вредоносное ПО может управлять и использовать для получения прибыли и выгоды.

При увеличении сложности и масштаба компьютерных систем, инциденты, связанные с использованием вредоносного программного обеспечения становятся неизбежными. Но также они предоставляют возможности для обучения. Разбор таких инцидентов – это лучший способ проработать произошедшее и зафиксировать выводы.

## II. Постановка задачи

Целью статьи является анализ инцидентов, произошедших за 2021 и 2022 гг., связанных с использованием вредоносного программного обеспечения.

## III. Общая статистика инцидентов в мире за 2021 и 2022 гг.

Внедрение вредоносного программного обеспечения в компьютерную сетевую среду имеет разные последствия в зависимости от замысла самого вредоносного ПО и схемы сети. Системы обнаружения и предотвращения вредоносных программ обходят вредоносные файлы в компьютерных системах, поскольку вредоносные программы становятся все более сложными и многочисленными [1].

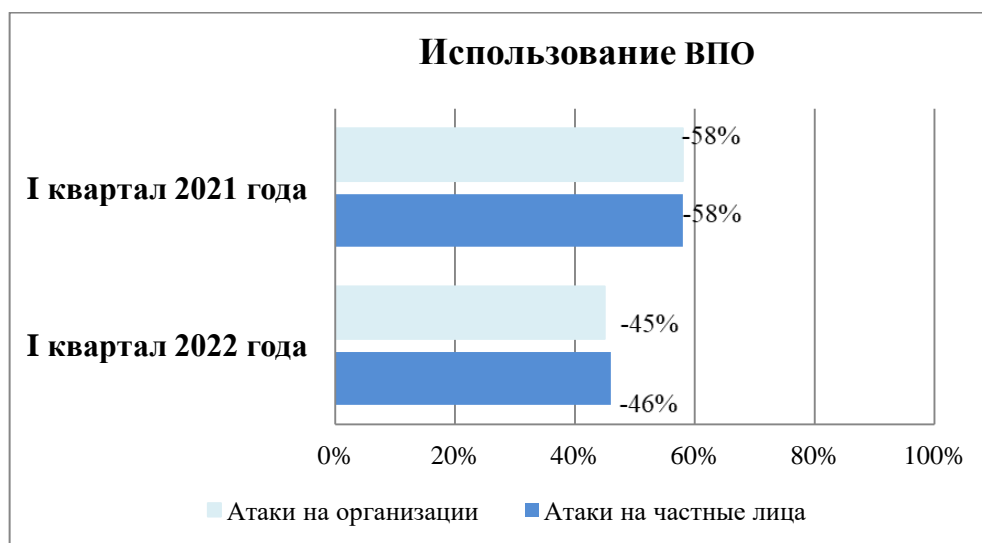


Рис. 1. Доля атак с использованием ВПО

Согласно статистике киберугроз за I квартал 2021 и 2022 гг. доля атак с использованием именно вредоносного ПО составляет соответственно 58% и 45-46% от остальных возможных типов атак как показано на рис. 1 [2, 3].

Из этого следует, что злоумышленники используют вредоносное программное обеспечение практически в половине инцидентов, связанных с кибератаками, то есть, другими словами, методы атак с использованием именно ВПО занимают практически 50% от остальных используемых кибератак.

#### **IV. Подробная статистика за 2021 год**

В течение 2021 года одними из самых популярных угроз фигурировали многочисленные вредоносные программы [4]. Согласно статистике, составленной «Лабораторией Касперского», около 15,45% компьютеров в мире хотя бы один раз подверглись веб-атаке с использованием вредоносного программного обеспечения.

Благодаря той же «Лаборатории Касперского» было выявлено 114 525 734 уникальных вредоносных URL. Из них было заблокировано только 64 559 357 уникальных вредоносных объектов [5].

Согласно статистике, предоставленной компанией «Positive Technologies», все больше злоумышленников разрабатывают свое вредоносное ПО для проведения атак на среды виртуализации. Некоторые из злоумышленников пытаются активно эксплуатировать уже найденные уязвимости в ПО для развертывания виртуальной инфраструктуры.

Также, компания «Positive Technologies» выявила, что самое часто используемое злоумышленниками вредоносное ПО – Ransomware или шифровальщики [2]. Шифровальщики – это вредоносное ПО устанавливаемое на компьютер жертвы, которое шифрует их файлы, а затем разворачивается и требует выкуп, чтобы вернуть эти данные пользователю. Они распространяются через ссылки и вложения электронной почты, а также через зараженные веб-сайты и USB-носители. Атаки шифровальщиков могут привести к дорогостоящим сбоям в работе и потере важной информации [2, 3].

Статистика Dr. Web, наоборот, показывает, что в 2021 году пользователей чаще всего атаковали трояны-загрузчики, которые в свою очередь устанавливали вредоносные программы [4].

«Лаборатория Касперского» также выявила, что атаки с использованием шифровальщиков отражены на компьютерах 366 256 уникальных пользователей, в том числе 92 863 корпоративных пользователей и 12 699 пользователей, связанных с малым и средним бизнесом. За период 2021 год, они выявили более 13 905 модификаций шифровальщиков и обнаружили 33 новых семейства.

Также, в течение 2021 года, на компьютерах 429 354 пользователей «Лаборатория Касперского» смогла выявить попытки запуска одной или нескольких вредоносных программ, называемых банковскими троянами, которые предназначены для кражи денежных средств с банковских счетов. Доля их атак на государственные учреждения составляет 18%.

Не менее важным является и то, что за 2021 год все та же «Лаборатория Касперского» зафиксировала попытки установки «майнера» на компьютерах 1 184 986 уникальных пользователей. В общем объеме атак доля «майнеров» составила 2,19% [5]. «Майнер» использует ноутбук, компьютер, смартфон или любое другое подключенное устройство для «майнинга» криптовалют. Он использует процессор и оборудование для выполнения «майнинга», что приводит к чрезмерному использованию аппаратных ресурсов. В худших случаях чрезмерное использование может привести к увеличению потребления энергии и необратимому повреждению устройства или машины.

Отчет компании «Positive Technologies» показывает, что доля «майнеров» составляет примерно 8%.



Также стоит отметить, что за 2021 год было выявлено рекордное количество атак нулевого дня, число которых составило 57. За всю историю в любой другой год наблюдений, это является самым большим числом атак [7]. Атака нулевого дня – это кибератака, направленная на уязвимость программного обеспечения, которая неизвестна его поставщикам или антивирусным программам.

За 2021 год «Лаборатория Касперского» обнаружила несколько уязвимостей, среди которых:

CVE-2021-28310 – ошибка типа out-of-bounds (OOB) write в Desktop Windows Manager, позволяющая записать данные за границы буфера памяти, поэтому может быть использована для повышения привилегий в системе;

CVE-2021-31955 – информационная утечка, позволяющая злоумышленнику получить адрес структуры EPROCESS в памяти ядра;

CVE-2021-31956 – ошибка переполнения памяти в драйвере NTFS, которая дает в дальнейшем возможность читать и писать произвольные данные в памяти ядра, что, в свою очередь, может привести к повышению привилегий в системе;

CVE-2021-40449 – ошибка типа Use-After-Free в драйвере win32k, которая проявляется во время обработки пользовательских функций обратного вызова и позволяет в конечном итоге получить контроль над атакуемой системой [5].

## **V. Подробная статистика за 2022 год**

Согласно статистике, предоставленной «Лабораторией Касперского», в течение 2022 года 15,37% компьютеров интернет-пользователей в мире хотя бы один раз подверглись веб-атаке с использованием вредоносного программного обеспечения. По сравнению с 2021 годом, этот показатель снизился хоть и не значительно.

Также за исследуемый период веб-антивирус «Лаборатории Касперского» смог выявить 109 183 489 уникальных вредоносных объектов (скриптов, эксплойтов, исполняемых файлов и т.д.) и 101 612 333 уникальных вредоносных URL [6].

В 2022 году наиболее лидирующую позицию занимают все те же шифровальщики, использующиеся практически в каждой второй атаке с использованием ВПО. Но по сравнению с IV кварталом 2021 года, доля шифровальщиков несколько снизилась (с 53% до 44%). Такие изменения в определенной степени вызваны тем, что часть группировок вымогателей переходит на промышленный шпионаж без шифрования устройств. Некоторые из шифровальщиков, напротив, не присылают ключи дешифрования, нацеливаясь на разрушение инфраструктуры. Также растет число атак вайперов, которые уничтожают данные.

«Лаборатория Касперского» в свою очередь выявила более 23 807 модификаций шифровальщиков и обнаружила 41 новое семейство. Также было зафиксировано, что в течение 2022 года шифровальщиками были атакованы 271 215 уникальных пользователей [6].

Согласно статистике «Positive Technologies» за 2022 год [3], злоумышленники стали активно распространять шпионское ПО, направленное на кражу учетных данных. Их доля увеличилась примерно на 10% по сравнению с 2021 годом. В атаках на частных лиц, учетные данные становятся известны злоумышленникам примерно в 46% случаев. Также они используются и при атаках на государственные учреждения и составляют 8%.

Согласно отчету «Лаборатории Касперского» [6] в течение 2022 года были зафиксированы попытки установки майнера на компьютерах 1 392 398 уникальных пользователей. В общем объеме атак доля майнеров составила 2,86%.

ВПО продолжает попадать в официальные магазины приложений. Большинство из таких приложений являются банковскими троянами и загрузчиками, а количество скачиваний таковых пользователями в некоторых случаях превышает сотни тысяч [3].

В 2022 году атаки банковских троянов стали более направлены на частные лица и, соответственно уменьшены на государственные организации. Загрузчики - наоборот. Их доля атак на организации увеличилась более чем в 3 раза (с 7% до 22%) по сравнению с 2021 годом, и уменьшилась для частных лиц на 6% (с 16% до 10%).

За исследуемый период «Лаборатория Касперского» отразила на компьютерах 376 742 пользователей попытки запуска одного или нескольких финансовых зловредов, предназначенных для кражи денежных средств через онлайн-доступ к банковским счетам [6].

Самыми популярными угрозами для мобильных устройств оказались различные шпионские и банковские трояны, а также загрузчики вредоносного ПО и трояны, способные выполнять произвольный код [4].

Также стоит отметить, что «Лаборатория Касперского» зафиксировала срабатывание антивируса 89% компьютеров пользователей, на которых были зарегистрированы различные рекламные программы и их компоненты, или, другими словами, заражение через интернет. Были отражены 505 879 385 атак, которые проводились с интернет-ресурсов, размещенных в различных странах мира.

## **VI. Заключение**

Как в 2021, так и в 2022 году использование вредоносного программного обеспечения является лидирующим методом атаки, который используют злоумышленники.

Отчеты за 2021 год показали, как злоумышленники перешли к шифровальщикам. Это показало, что варианты вредоносных программ в 2021 году становятся все более сложными и уклончивыми, что затрудняет их обнаружение и реагирование на них.

В 2022 году некоторые традиционно популярные формы вредоносных программ, теряют популярность, поскольку злоумышленники меняют свою тактику для атаки на новые или недостаточно используемые уязвимости.

Из приведенного в статье анализа известно, что подвержено блокировке меньше уникальных вредоносных программ, чем было обнаружено. Это говорит о том, что некоторые выявленные сигнатуры полностью не известны современным антивирусным программам. Вследствие этого, они не могут обнаружить способы их блокировки.

В будущем, неизвестно, какие новые угрозы могут возникнуть, и как может измениться ландшафт вредоносных программ. Стоит отметить и тот факт, что создание принципиально новых вредоносных программ, способных обойти все методы защиты, не является невозможным, но оно требует много времени, большого числа профессионалов и значительных денежных вложений, что сводит количество таких приложений к минимуму.

Вредоносное ПО – это постоянно развивающаяся угроза, которая требует постоянной бдительности и применения активных мер для обеспечения безопасности пользователей и предприятий. Поэтому крайне важно иметь представление о том, как работают различные виды вредоносных программ, и о том, какие шаги можно предпринять для защиты данных от вредоносных атак.

Проведенное исследование должно привлечь внимание к наиболее актуальным методам и мотивам кибератак, а также оказать помощь в выявлении основных тенденций в изменении ландшафта киберугроз, связанных с использованием вредоносного программного обеспечения.

Научный руководитель: Данилова Ольга Тимофеевна, Омский государственный технический университет.

## **Библиографический список**

1. CISCO. URL: <https://www.cisco.com> (дата обращения: 25.03.2023).

2. Актуальные киберугрозы I квартал 2021 года: Positive Technologies. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Cybersecurity-threats-2021-Q1-rus.pdf> (дата обращения: 25.03.2023).

3. Актуальные киберугрозы I квартал 2022 года: Positive Technologies. URL: [https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ruru/analytics/Актуальные\\_киберугрозы\\_Q1\\_2022\\_RUS.pdf](https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ruru/analytics/Актуальные_киберугрозы_Q1_2022_RUS.pdf) (дата обращения: 25.03.2023).

4. Обзор вирусной активности за 2021 год: Dr.Web. URL: [https://st.drweb.com/static/new-www/news/2022/DrWeb\\_review\\_year\\_2021.pdf](https://st.drweb.com/static/new-www/news/2022/DrWeb_review_year_2021.pdf) (дата обращения: 25.03.2023).

5. Kaspersky Security Bulletin 2021. Статистика. URL: <https://securelist.ru/kaspersky-security-bulletin-2021-statistics/104160/> (дата обращения: 25.03.2023).

6. Kaspersky Security Bulletin 2022. Статистика. URL: <https://securelist.ru/ksb-2022-statistics/106227/> (дата обращения: 25.03.2023).

7. Число кибератак в России и в мире. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 25.03.2023).

*Дата поступления статьи: 26.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Набатова, 2023

УДК 004.056.5

*И. И. Охотникова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

**Аннотация.** Воздействие злоумышленником на дестабилизирующие факторы представляет угрозу для любой информационной системы. Для того чтобы минимизировать риски информационной безопасности из-за воздействия дестабилизирующих факторов, необходимо уметь их определять и классифицировать. Для формирования групп дестабилизирующих факторов существует множество методов в зависимости от цели исследования. В данной работе построено дерево решений для формирования групп дестабилизирующих факторов на основе алгоритма С4.5.

**Ключевые слова:** дестабилизирующие факторы, дерево решений, алгоритм С4.5, информационная безопасность.

### **I. Введение**

Защита информации от несанкционированного доступа, использование и модификация являются основными проблемами, с которыми сталкивается информационная безопасность сегодня. Суть информационной безопасности заключается в обеспечении жизнеспособного решения этих критических проблем.

Под угрозами информационной безопасности (ИБ) понимаются фактические или потенциальные действия, обстоятельства или события, которые приводят к овладению,

хищению, искажению или уничтожению информации в системе обработки информации (СОИ). Данные угрозы являются дестабилизирующими факторами.

Последствия нарушения безопасности могут быть катастрофическими для бизнеса и привести к потере репутации, финансов и доверия клиентов. Поэтому очень важно определить дестабилизирующие факторы, которые могут поставить под угрозу безопасность информационных систем организации.

Совокупность условий и источников возникновения дестабилизирующих факторов (ДФ) является причиной нарушений ИБ. Поэтому необходимо подробно описать классифицированные группы дестабилизирующих факторов и установить конкретизированный перечень причин нарушения защищенности информации.

ДФ могут, как изначально содержаться в системе, так и появиться извне, как действия злоумышленника или из-за различных природных явлений. Дестабилизирующие факторы также имеют большое значение в оценке эффективности системы защиты информации.

Определение перечня дестабилизирующих факторов, их групп и сути возникновения имеет огромное значение для любой системы, содержащей информацию. Важно понимать угрозы для каждой конкретной системы и максимально обезопасить ее от действий злоумышленников и случайных факторов воздействия. Классификация ДФ позволит установить наиболее уязвимые места системы. В данной работе дерево решений использовалось для формирования групп ДФ.

## II. Теория

Любую информацию можно поделить на группы, согласно определенным целям и мотивами классификации информации. Для формирования групп используются различные критерии, позволяющие более точно отразить цель исследования.

Для классификации ДФ можно использовать такие критерии, как происхождение, характер возникновения и воздействия, вероятность и цели воздействия.

Дерево решений - это мощный инструмент, который может помочь в выявлении и анализе различных факторов. Он работает путем разбиения проблемы на ряд более мелких, более управляемых решений, каждое из которых приводит к определенному набору возможных результатов. Благодаря дереву решений можно эффективно классифицировать дестабилизирующие факторы по выбранному критерию. Дерево решений работает как блок-схема, разделяя точки данных на две похожие категории за раз: от «ствола дерева» до «ветвей» и «листьев», где категории становятся более сходными в конечном итоге [1].

В настоящий момент существует множество алгоритмов построения дерева решений, в частности - ID3, CART, C4.5, C5.0, NewId, ITrule, CHAID, CN2 и т.д. [2].

Основная цель дерева решений — разделить набор данных в виде дерева на основе набора правил и условий [3].

В данной работе воспользуемся алгоритмом C4.5, так как он имеет довольно понятное представление и качественный механизм, а также является усовершенствованной версией алгоритма ID3, в которую добавлена возможность работы с пропущенными значениями атрибутов [1].

Рассмотрим централизованную вычислительную систему организации N, включающую в себя сервер, три автоматизированных рабочих места. При рассмотрении данной системы были выявлены входные данные из 20 ДФ, в таблице 1 представлен сокращенный список входных данных.

Далее необходимо осуществить декомпозицию ДФ на счетное количество однородных подмножеств. Для того чтобы классифицировать дестабилизирующие факторы, построим дерево решений, которое представляет собой древовидный граф, состоящий из узлов и листьев, соединенных между собой дугами.

## Сокращенный список ДФ

№	Описание ДФ
1	Стихийные бедствия и аварии
2	Сбои и отказы оборудования (технических средств)
3	Последствия ошибок проектирования и разработки компонентов системы
4	Вербовка персонала или отдельных пользователей, имеющих определенные полномочия
5	Неправомерное включение оборудования или изменение режимов работы устройств и программ
6	Неумышленная порча носителей информации
7	Применение подслушивающих устройств, дистанционная фото- и видеосъемка и т.п.
8	Вскрытие шифров криптозащиты информации
9	Внедрение аппаратных спецвложений
10	Неадекватные обновления и исправления программного обеспечения

Для построения дерева решений на основе алгоритма С4.5 необходимо сформировать признаки для классификации ДФ, которые обозначаются  $S_n$ .

Как показано в [4] Смирновым В.В., при качественном анализе относительно полного множества ДФ можно выделить следующие подмножества:

1. подмножество ДФ, где на вероятность реализации успешной атаки может повлиять ряд организационных действий;

2. второе подмножество включает угрозы, которые трудно предотвратить, но законы распределения вероятности возникновения которых были описаны. Вероятность их возникновения можно рассматривать как постоянную величину;

3. к третьему подмножеству относятся неустранимые ДФ, не вошедшие во второе подмножество. Вероятность возникновения этой категории ДФ не поддается влиянию, и включает такие угрозы, как манипуляции над сообщениями, маскировку под зарегистрированного пользователя и т.п.

Данные признаки являются критерием классификации ДФ, который можно определить условно, как возможность влияния на успешное осуществление атак ДФ на ИС. Данные подмножества примем за признаки формирования групп ДФ.

Полученные данные представляются в таблице следующим образом. В строках – наименование дестабилизирующих факторов, в столбцах – признаки, по которым происходит разбиение. Последний столбец – целевой признак.

Далее проводится оценка среднего количества информации, необходимого для определения класса примера из множества ДФ, определяется признак, выступающий проверкой для корневого узла дерева, рассчитываем значение показателя Gain от использования каждого атрибута в качестве узла дерева [5, 6].

После первоначальных расчетов выделяется показатель с максимальным значением показателя Gain, который, согласно алгоритму, выбирается в качестве атрибута расщепления для корня дерева решений. Все остальные разветвления рассчитываются аналогично [5, 6].

После создания дерева решений его можно использовать для прогнозирования новых входных данных, следуя по пути вниз по дереву на основе значений признаков входных данных [1].

### III. Представление результатов

Благодаря полученным результатам удалось сформировать дерево решений, удовлетворяющее данным условиям (рис. 1).

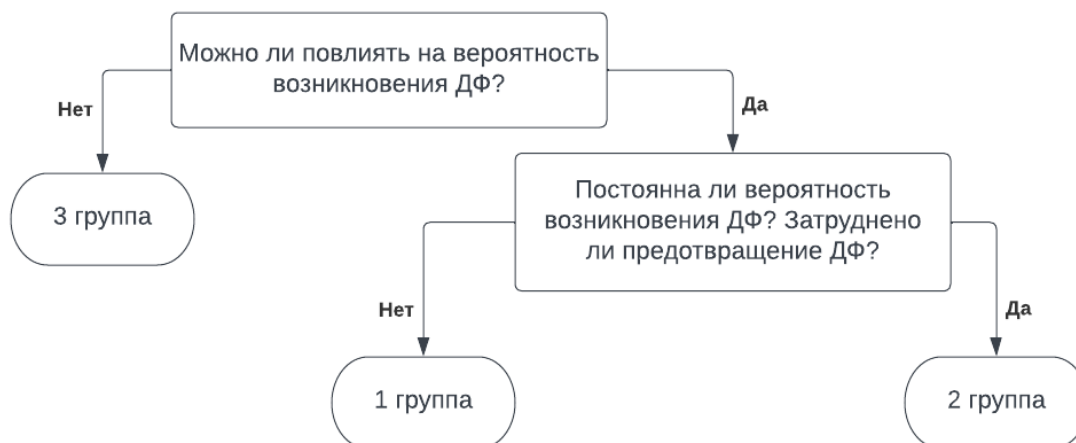


Рис. 1. Дерево решений для формирования групп ДФ

По построенному дереву решений проведем классификацию выбранных дестабилизирующих факторов (Таблица 1).

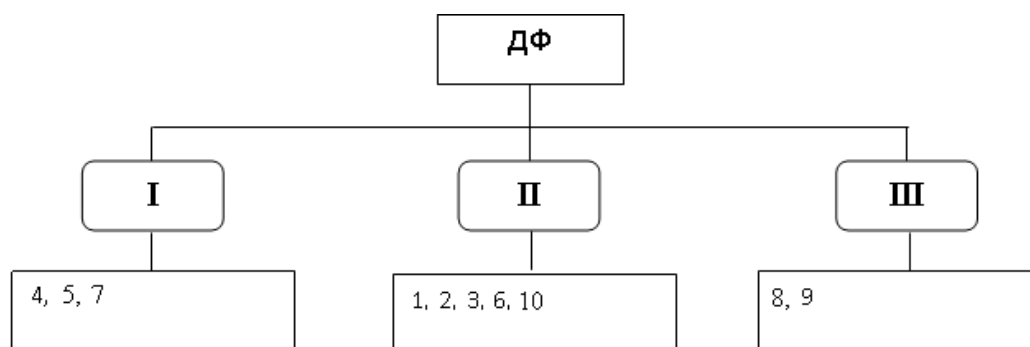


Рис. 2. Классификация ДФ по построенному дереву решений

На рис. 2 сформированы группы и отображены дестабилизирующие факторы согласно полученным группам. По данному алгоритму возможно создание других групп дестабилизирующих факторов, а также их анализ.

#### IV. Заключение

Дестабилизирующие факторы важны для понимания защищенности любой информационной системы. Недостаточное внимание к дестабилизирующим факторам может повлечь за собой возникновение уязвимостей в системах обработки информации и системах защиты информации, что нанесет ущерб организации или государству в целом.

Данная декомпозиция ДФ по группам позволяет определить, какими мерами можно справиться с уязвимостями и можно ли с ними справиться вообще, т.е. определить ДФ, которые нанесут системе обработки информации наибольший вред.

В ходе работы было построено дерево решений для классификации ДФ, в дальнейшем возможна разработка программного продукта для дальнейшего упрощения построения дерева решений и самой классификации.

Основным недостатком алгоритма С4.5 являются слишком «ветвистые» деревья, если атрибуты множества содержат много уникальных значений, в данной ситуации атрибуты ограничены, что позволяет построить понятное для человека дерево решений.

Данный алгоритм является наиболее подходящим для предметной области, поскольку самым большим его достоинством является простая интерпретация, довольно высокая

скорость работы, работа с дискретными значениями, а выходные данные легко понимаются человеком. На основе выбранного алгоритма построена модель решающего дерева.

Научный руководитель: Данилова Ольга Тимофеевна, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Мефтахетдинова Д. Р., Магеррамов З. Т. Анализ дерева решений и логистический регрессионный анализ как аналитические методы системы поддержки принятия решений // Sciences of Europe. 2023. № 112. С. 69-72.
2. Деревья решений: общие принципы. URL: <https://loginom.ru/blog/decision-tree-p1> (дата обращения: 14.03.2023).
3. Эшанкулов Х. И., Маликов А. Б. Regression based on decision tree algorithm // universum: технические науки. 2022. № 6-6 (99). С. 55-58.
4. Парахин В. Н., Смирнов В. В. Один из подходов к классификации угроз безопасности узлов связи // Тезисы научно-практической конференции в в/ч 73790. М.: в/ч 73790, 1997.
5. Деревья решений — С4.5 математический аппарат. Часть 1. URL: <https://loginom.ru/blog/decision-tree-c45-1> (дата обращения: 14.03.2023).
6. Деревья решений — С4.5 математический аппарат | Часть 2. URL: <https://loginom.ru/blog/decision-tree-c45-2> (дата обращения: 14.03.2023).

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© И. И. Охотникова, 2023

УДК 004.056

*Э. Н. Садыкова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

**Аннотация.** В статье выделены и рассмотрены основные технологии и поведения вредоносного программного обеспечения. Представлены подходы к выявлению деятельности вредоносного ПО, а также выделены инструменты и методы устранения современных вредоносных программ.

**Ключевые слова:** вредоносное программное обеспечение, методы и инструменты, ИТ-среда, защита информации.

### I. Введение

Экономика, связанная с вредоносными программами, выросла, и производство вредоносных программ стало крупным бизнесом для подпольной ИТ-индустрии. Хотя многие из ранних случаев массового заражения были широко известны и были очень

очевидными для пользователя событиями, современные вредоносные программы обычно разрабатываются так, чтобы их поведение было гораздо более изощренным. Подобно тому, как вирус Эбола значительно более опасен и смертелен для своих жертв, чем обычная простуда, он также имеет тенденцию довольно быстро выгорать, в то время как обычная простуда остается распространенной сегодня. То же самое относится и к сегодняшнему ландшафту вредоносных программ. Некоторые из них предназначены для получения больших результатов, в то время как большинство незаметно заражают компьютеры с намерением скрыть свое присутствие как можно дольше для получения максимальной выгоды.

Слово «шпионское программное обеспечение» (шпионское ПО) часто неправильно используется для описания всех типов нежелательного программного обеспечения, проникающего на компьютеры. Шпионское ПО по определению является лишь небольшой частью возможных типов вредоносных программ, встречающихся в нашем мире. Это неправильное использование терминологии подчеркивает одну из центральных проблем, связанных с истинным пониманием ландшафта вредоносного кода, который потенциально может заразить незащищенные серверы и рабочие столы.

Вредоносное ПО, сокращение от «вредоносное программное обеспечение» – правильный термин, используемый для обозначения всех классов нежелательного и потенциально нежелательного программного обеспечения, – представляет собой серьезную проблему в ИТ-средах. Как и все типы программного обеспечения, оно со временем развивается, появляются новые версии, использующие недавно обнаруженные уязвимости в операционных системах (ОС). Вредоносное ПО первых дней часто приводило к полному уничтожению компьютеров и их данных.

В наши дни разработка вредоносных программ – это большой бизнес. Чаще всего вредоносное ПО используется как инструмент для вымогательства денег у своих жертв. Тактика мошенничества и запугивания является основным приоритетом при создании текущего вредоносного ПО. Вредоносное программное обеспечение в виде мошеннических программ безопасности используется для того, чтобы убедить необразованных пользователей компьютеров приобрести программное обеспечение для удаления у тех самых людей, которые написали само вредоносное ПО. Другие типы собирают конфиденциальную информацию, такую, как номера кредитных карт и социального страхования, оставленные в кэше браузера, и отправляют ее для ненадлежащего использования.

Проблема со всеми этими типами нежелательного программного обеспечения заключается в широком распространении их механизмов для атаки на системы и их полезной нагрузкой после заражения.

## **II. Постановка задачи**

Цель данной статьи – это выйти за рамки простых классификаций вредоносных программ и сосредоточиться конкретно на технологиях, поведении и методах, используемых каждым из них для заражения компьютеров, сокрытия себя и пребывания на компьютерах как можно дольше. Как и в случае с развитием индустрии вредоносных программ, в последние годы новые версии ее программного обеспечения стали значительно более интеллектуальными. Понимание того, как поведение вредоносных программ изменилось с течением времени, поможет нам понять масштабы современного ландшафта вредоносных программ.

## **III. Теория**

Вначале процесс внедрения вредоносного ПО для Windows был относительно легким для обнаружения невооруженным глазом. По сравнению с сегодняшними вредоносными программами ранние вирусы часто использовали свои собственные



индивидуализированные процессы для выполнения действий, желаемых создателем вредоносного ПО. Наличие собственного отдельного процесса упростило обнаружение ранних попыток вредоносных программ путем небрежного просмотра содержимого диспетчера задач Windows. Опытный ИТ-специалист может просмотреть список запущенных процессов диспетчера задач на зараженном компьютере и часто находит процессы, которые кажутся неуместными:

- возможно, процесса не было в списке организаций, связанных с одобренными приложениями;
- процессы иногда маскировались именами файлов, похожими на те, которые уже есть в системе, что приводило к дублированию записей в списке;
- иногда процессам давали похожие, хотя и неточные названия, что также выделяло их для опытного глаза.

В любом из этих случаев процесс определения того, что компьютер действительно был заражен, был проще, чем сегодня. Хотя удаление компонентов вредоносного ПО может быть сложным, его идентификация может быть выполнена с помощью традиционных методов устранения неполадок ИТ. Приложения, которые помогали в процессе идентификации, могли запускаться по мере необходимости после подтверждения заражения для удаления вредоносного программного обеспечения.

Однако сегодняшнее вредоносное ПО достигло уровня сложности, при котором его идентификация уже не может быть завершена невооруженным глазом. В большинстве случаев его также нельзя определить с помощью обычных приложений для устранения неполадок, которые традиционно входят в набор инструментов ИТ-специалиста. Хотя разные категории вредоносного ПО используют разные механизмы обмана, чтобы избежать обнаружения, некоторые текущие общие модели поведения требуют специальных приложений для поиска и избавления от вредоносного программного обеспечения. Далее рассмотрим набор этих моделей поведения.

Этот набор включает только подмножество известных моделей поведения. Поскольку разработка вредоносных программ находится в постоянном развитии, используемые механизмы всегда модифицируются, чтобы избежать обнаружения.

#### **IV. Технологии и поведение современных вредоносных программ**

##### ***Исправление системных файлов и заражение процессов***

Когда типичный ИТ-специалист думает о термине «исправление», он обычно описывает ежемесячный процесс, выполняемый для обновления операционных систем (ОС) и приложений с помощью недавно выпущенного кода поставщика. Но понятие исправления является гораздо более общим, чем это определение. Любой файл, будь то файл ОС, файл для приложения или сам файл данных, можно «исправить» или обновить с помощью нового кода.

В среде вредоносных программ этот процесс исправления включает обратное проектирование заведомо исправных системных файлов и внедрение пользовательского кода в результат, характерный для вредоносного программного обеспечения. Это действие обычно происходит с системными файлами, такими как исполняемые файлы или библиотечные файлы, используемые для обработки определенных действий. В любом из этих случаев необходимо учитывать результат. Исполняемые файлы и библиотечные файлы в ОС Windows представляют собой наборы функций, которые позволяют выполнять действия в системе. Расширив эти функции, включив в них желаемое поведение вредоносных программ, «исправленный» системный файл теперь может работать как для своего первоначального использования, так и для функций, необходимых вредоносному программному обеспечению (рис. 1).

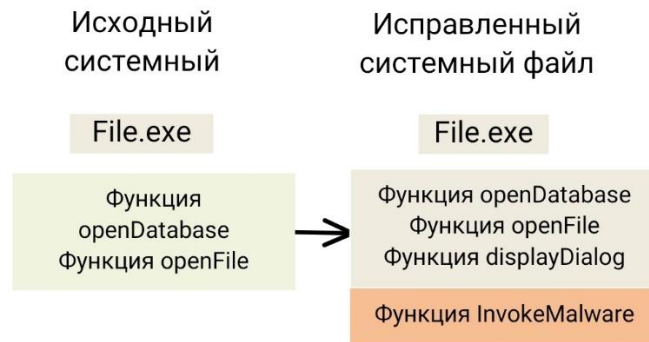


Рис. 1. После исправления исходный системный файл может выполнять функции вредоносных программ

Проблема с идентификацией в этом случае заключается в том, что в файловую систему фактически не было добавлено ничего «нового». Список запущенных процессов зараженного компьютера показывает только ожидаемые процессы, эффективно скрывая присутствие вредоносного ПО от невооруженного глаза и стандартных средств устранения неполадок. Единственный способ устранить вредоносное ПО – это выделить и удалить фрагменты кода, вызывающие нарушение, из файла.

#### **Реанимация кода**

Эта проблема становится еще более коварной, когда во время одного заражения устанавливается несколько пакетов вредоносного программного обеспечения. При интеграции во время разработки кода эти пакеты могут быть дополнены возможностью отслеживать присутствие друг друга. Получившийся в результате пакет вредоносных программ может отслеживать удаление других пакетов вредоносных программ, находящихся в системе, подобно тому, как это показано на рисунке 2. Если какой-либо из этих пакетов будет удален, как правило, в рамках операции по удалению, любые оставшиеся компоненты вредоносного ПО, которые все еще остаются резидентными, могут перезапустить или даже переустановить отсутствующее программное обеспечение из фрагментов, оставшихся на диске или загруженных из Интернета.

Эта гарантия того, что вредоносное ПО остается в системе даже во время действий по удалению, усложняет процесс удаления. Стандартные инструменты удаления, такие как ручное удаление файлов или реестра, удаление процессов или многие другие традиционные инструменты устранения неполадок, доступные ИТ-специалистам, недостаточны для одновременного полного удаления каждой части. Таким образом, отсутствие даже одного компонента или неудаление их всех в течение достаточно короткого промежутка времени приводит к повторному заражению машины в течение короткого периода времени.

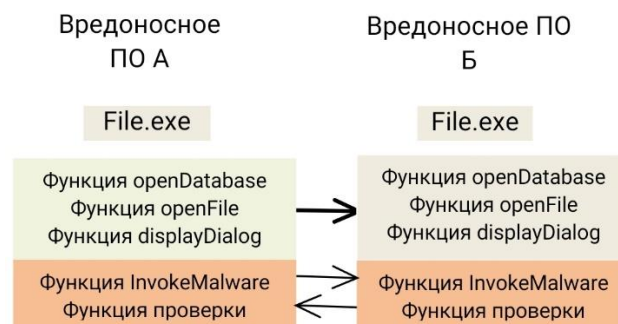


Рис. 2. Экземпляр вредоносного ПО А содержит код, проверяющий наличие экземпляра вредоносного ПО В. Если он отсутствует в системе, экземпляр А пытается установить или перезапустить экземпляр В

### ***Руткит и поведение маскировки***

Последней классификацией современного поведения, которая особенно опасна из-за своей способности скрываться даже от родной ОС, являются руткиты. Хотя этот класс вредоносных программ для Windows существенно отличается от руткитов прошлых лет для UNIX, он фокусируется именно на маскировке.

Руткит используют некоторые из тех же функций исправления файлов, описанных ранее, но для другой цели. Исправление программного обеспечения в «обычном» вредоносном ПО обычно устанавливает типы функций, необходимые для обработки полезной нагрузки вредоносного ПО, вместо этого руткиты используются для перенаправления вызовов системных функций через процесс, называемый «перехватом системных вызовов». Проще говоря, каждый системный файл оснащен набором адресов, по которым он может рассчитывать на поиск других функций в системной оперативной памяти. Когда ему требуется использование другой функции, он ищет эту функцию по указанному адресу. Если компьютер заражен руткитом, руткит изменяет целевое местоположение для другой функции на свое собственное местоположение в памяти. Это позволяет руткиту перемещаться между уровнями системы. Там он может определить, какие запросы выполняются системой, а затем изменить результаты этих запросов, когда они возвращаются обратно в функцию, которая инициировала запрос. Как правило, изменение делается для того, чтобы система не отображала наличие файлов, связанных с самим руткитом или другими вредоносными программами в системе.

Конечным результатом заражения руткитом является то, что руткит фактически становится «невидимым» как для системы, так и для пользователя. Попытка просмотреть содержимое папки через графический интерфейс или командную строку перехватывается руткитом, и любые следы присутствия вредоносных файлов удаляются до того, как результат отображается пользователю.

## **V. Инструменты и методы устранения современных вредоносных программ**

В этой, заключительной части статьи, основное внимание уделяется избавлению от этих постоянно развивающихся маленьких жучков во всей ИТ-среде бизнеса. Поскольку вымогательство и получение финансовой выгоды являются основными мотивами для создателей вредоносных программ, нам необходимо как никогда прежде не допускать вредоносное ПО в нашу ИТ-среду.

### ***Обнаружение на основе поведения***

Что интересно во всех формах вредоносных программ, независимо от их вектора заражения, полезной нагрузки или сигнатуры, так это то, что практически все формы вредоносных программ, как правило, направлены на достижение одной из ограниченного набора целей. Поскольку механизмов для установки и обработки вредоносных программ много, а целей мало, другая архитектура для идентификации вредоносных программ может быть лучше. Обнаружение на основе поведения является той альтернативной архитектурой.

Необходимо рассмотреть клиенты для защиты от вредоносных программ, которые уже могут быть установлены на серверах и настольных компьютерах в нашей среде. В настоящее время они настроены на многократное сканирование системы и запущенных процессов на наличие программного обеспечения, похожего на известное вредоносное ПО. Обновления сигнатур происходят ежедневно, а иногда и ежечасно, чтобы быть в курсе последних событий. Теперь рассмотрим реконфигурацию этого программного обеспечения.

В этой ситуации может быть значительно проще написать клиент для защиты от вредоносных программ, который всегда ищет определенные типы поведения. Независимо от того, как часто и насколько вредоносное ПО видоизменяется в попытках избежать обнаружения, каждый раз, когда оно пытается выполнить свою миссию, клиент обнаружит

эту опасную активность и предотвратит ее. Клиенты также могут отследить источник ненадлежащей активности и начать действия по исправлению, такие как удаление. Если в системе отсутствуют правильные процедуры удаления, чтобы инициировать удаление, компьютер остается частично защищенным, в то время как нежелательное поведение остается запрещенным клиентом.

**Защита на уровне ядра.** С точки зрения программного уровня, чем ближе продукты для защиты от вредоносных программ могут быть доставлены к ядру, тем больше вероятность того, что они будут иметь возможность идентифицировать активность вредоносных программ, когда они происходят в системе. Когда вредоносным программам (прекрасным примером являются руткиты) удастся протиснуться между любым механизмом защиты от вредоносных программ и ядром, механизму сканирования вредоносных программ трудно или невозможно найти этот плохой код. И наоборот, когда программное обеспечение для защиты от вредоносных программ работает на уровне непосредственно над ядром, оно сохраняет возможность видеть все входные и выходные данные по мере их прохождения. Очевидно, что с изменениями ядра при выпуске Windows Vista и Windows Server 2008 этот уровень разработки драйверов должен происходить с включением самой Microsoft.

**Хирургическая коррекция.** Если средство удаления вредоносного ПО, которое мы пытались использовать, когда-либо приводило к сбою зараженной системы, мы знакомы с необходимостью тщательно подобранных возможностей удаления после обнаружения вредоносного ПО. Когда процесс удаления заходит слишком далеко в том, что он удаляет из системы, до такой степени, что система перестает быть стабильной, система удаления или сценарии, используемые для ее инструктирования, становятся неэффективными. Хирургическое исправление позволяет системе удаления вредоносных программ удалять не только файлы и ключи реестра, в которые проник вредоносный код, но и определенные исправления для системных файлов. В результате получается ИТ-среда, которая может легко пережить случай заражения с минимальным риском для работы настольных компьютеров и серверов.

**Предзагрузочное сканирование.** Руткиты особенно опасны из-за того, что они проникают в файловую систему и впоследствии скрывают свое присутствие. Один из способов найти установленные руткиты в системах, когда все другие варианты не работают, – это посмотреть на эту файловую систему с двух разных точек зрения. Первая точка зрения исходит от самой файловой системы. Вторая – из размонтированного экземпляра файловой системы. Когда файловая система отключена, механизмы, описанные во второй статье этой серии, не могут работать, чтобы включить эффект маскировки. Глядя на различия в результатах каждого из этих двух сканирований, любое найденное различие должно быть набором кода, который пытался скрыть себя. Использование сканирования перед загрузкой того, что фактически является размонтированной файловой системой, позволяет выполнить второе из этих двух необходимых сканирований.

**Брандмауэры исполняемого уровня.** Наконец, ОС Windows по умолчанию не имеет логики для определения того, какие процессы должны и не должны выполняться в системе. Таким образом, любой процесс, пытающийся привлечь внимание процессора для выполнения, будет запущен. Во многих средах необходим тип исполняемого брандмауэра в самой системе. Этот брандмауэр позволяет администраторам определять процессы, которые должны выполняться в системах. Запрещается запускать процессы, не принадлежащие среде. Этот внутрисистемный «брандмауэр» помогает предотвратить запуск в системе определенных типов вредоносных программ, если они не входят в белый список допустимых программ. Это также служит второстепенной цели предотвращения запуска законных, но неуместных и потенциально опасных приложений на оборудовании компании, таких как приложения для обмена файлами, игры и т.д.

## VI. Заключение

Для ИТ-сред, которые в прошлом имели успех с использованием традиционных инструментов устранения неполадок, невооруженным глазом и подхода «исправить после поломки», необходимо внедрить новые инструменты, которые предотвращают проблемы до их возникновения.

Антивредоносные инструменты вчерашнего дня, которые устанавливались и запускались только после того, как произошло событие, больше не являются лучшими практиками для проактивных ИТ-сред. Для защиты ИТ-среды в целом необходимы всегда активные альтернативы, использующие несколько механизмов для поиска вредоносных программ во всех их категориях и поведении.

Научный руководитель Трапезников Евгений Валерьевич, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Алёшин С. Ю. Описание и классификация вредоносного программного обеспечения. Основные методы защиты, используемые антивирусными программами // Молодой ученый. 2022. № 2 (397). С. 5–10.
2. Вишняков А. Ландшафт угроз вредоносного ПО: тренды и прогнозы // Вредоносное ПО. Топ угроз и технологии защиты // Positive Technologies. 2021. №1. С. 1–8.
3. Филюшин Д. А., Путилов А. О. Анализ современного вредоносного программного обеспечения: принцип действия, особенности реализации // Cyberleninka. 2022. №2. С. 63–65.
4. Фатхи В. А., Отакулов А. С. Вредоносное программное обеспечение // Modern Science. 2020. № 10-2. С. 542–545.

*Дата поступления статьи: 21.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Э. Н. Садыкова, 2023

УДК 004.8

*А. Е. Сулавко<sup>1</sup>, И. Е. Панфилова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

## **ВЕРИФИКАЦИЯ ЛИЧНОСТИ СУБЪЕКТОВ ПО ЛИЦУ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «БИОМЕТРИЯ-КОД»**

**Аннотация.** В связи с актуальностью обеспечения защищенности искусственного интеллекта и повышения его надежности при работе с биометрическими данными, в работе предложена реализация системы верификации личности субъектов по лицу на основе нейросетевых преобразователей «биометрия-код». В качестве модулей детекции лиц и извлечения из них информативных признаков использовались сверточные нейронные сети.

Наилучшее достигнутое на специально подготовленном наборе данных значение EER составило 0,27%.

**Ключевые слова:** преобразователь биометрия-код, лицевая биометрия, глубокое обучение, детекция лиц, сверточная нейронная сеть.

## **I. Введение**

На сегодняшний день практически любой ноутбук, смартфон или планшетный компьютер имеют видеокамеру, которую можно использовать в целях идентификации и аутентификации владельца устройства. Однако доверие к лицевым биометрическим системам во многом определяется тем, на каких данных и каким алгоритмом осуществлялось их обучение. Так алгоритмы глубокого обучения, лежащие в основе большинства приложений лицевой биометрии, не позволяют осуществлять автоматическое обучение без контроля со стороны человека. Также подобные алгоритмы теряют устойчивость, если выборка незначительна в объеме или недостаточно репрезентативна. В связи с этим, очевидным становится тот факт, что в задачах биометрической аутентификации методы глубокого обучения могут применяться только для настройки нейросетевых моделей, извлекающих признаки из образов. Повышение же надежности приложения и обеспечение защиты биометрических данных лица пользователя можно осуществлять путем применения нейросетевых преобразователей «биометрия-код» (НПБК), позволяющих связать биометрический образ лица человека и его личный криптографический ключ (пароль).

## **II. Декомпозиция системы распознавания образов лиц на блоки обработки данных**

Входные данные в системе распознавания лиц – это всегда изображение или видеопоток. Система распознавания лиц обычно определяется как процедура, состоящая из трех основных этапов: нахождение лица на изображении (детекция лица), извлечение признаков и распознавание лица, первые два из которых могут выполняться одновременно. Аналогичный подход использован при проектировании и разработке представленной в работе системы.

Особое распространение для решения задач двух первых этапов сегодня получили методы на основе сверточных нейронных сетей [1]. По сравнению с другими подходами, эти методы позволяют быстрее и эффективнее работать с изображениями. В связи с этим, в работе в качестве детектора лиц используется многозадачная каскадная сверточная нейронная сеть MTCNN [2], состоящая из трех подсетей - P-Net, R-Net и O-Net. Сеть обучена таким образом, что позволяет выделять и возвращать тензор из координат ограничивающей рамки лица и ключевых лицевых ориентиров.

Для извлечения признаков из ранее детектированных лиц используется сверточная нейронная сеть InceptionResnet v.1. Сеть использует архитектуру ResNet, в основе которой лежат соединения быстрого доступа (shortcut connections), пропускающие один или несколько слоев и выполняющие сопоставление идентификаторов.

Блок автоматического синтеза и обучения нейросетевых преобразователей биометрия-код строится на основе математического аппарата, представленного в ГОСТ Р 52633.5 – 2011 «Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа» [3].

## **III. Обучение нейросетевых моделей**

Для обучения указанных в структуре системы моделей детекции лиц и извлечения признаков из полученных изображений использовались два открытых набора данных: датасет WIDER FACE [4] для задачи детекции лиц на изображении с помощью сверточной нейронной сети MTCNN и датасет Wider Facial Landmarks in-the-wild (WFLW) [5] для задачи

извлечения признаков из детектированных лиц с помощью сверточной нейронной сети InceptionResnet v1.

Обучение однослойного нейросетевого преобразователя «биометрия-код», применяемого в качестве завершительного модуля системы, производилось в соответствии с процедурой, описанной в ГОСТ Р 52633.5-2011 [3].

Для задач тестирования нейросетевых преобразователей «биометрия-код» был сформирован набор данных, состоящий из видеозаписей лиц 76 испытуемых. С участием каждого испытуемого было записано по одной видеозаписи с трех видеокамер в трех вариантах освещения (всего 3 видеозаписи на каждого испытуемого): дневной свет (источник света – окно), искусственный свет в помещении (лампы сверху), отсутствие света в помещении. Допускалось использование разных локаций. На каждом из трех видео должен был присутствовать только один испытуемый, длительность одной видеозаписи составляет от 30 секунд до 1 минуты. На каждом видео испытуемый должен был повернуть голову вправо, влево, вверх, вниз и совершить круговое движение головой в обе стороны. Также допускалось перемещать голову вдоль кадра в любых направлениях.

#### IV. Оценка эффективности системы

Оценка эффективности работы биометрических систем, как и их надежность, определяется вероятностью ошибок «ложного принятия» (FAR) и «ложного отказа» (FRR), также называемых ошибками первого и второго рода соответственно. При изменении порога принятия образа, баланс вероятностей FRR и FAR изменяется. При равном соотношении  $FRR=FAR$  говорят о коэффициенте EER – равной вероятности ошибок (измеряемом также вероятностью или процентом). В представленной в работе в качестве порога выступает расстояние Хемминга от генерируемого с помощью НПБК бинарного кода до верного ключа пользователя.

Для расчета рассмотренных выше показателей эффективности (FAR, FRR и EER) набор данных с обезличенными испытуемыми случайным образом был разделен на 2 категории: «Зарегистрированные пользователи» (46 субъектов) и «Злоумышленники» (30 субъектов). Для каждого зарегистрированного пользователя на основе образов, полученных при «дневном свете», формировался НПБК, обучаемый на образах «Свой» и «Чужие». В качестве образов «Свой» использовались несколько кадров, извлеченных из соответствующей видеозаписи пользователя. В качестве образов «Чужие» использовались по одному кадру из видеозаписей «дневной свет» других 45 зарегистрированных пользователей (45 образов «Чужие»). Остальные образы «Свой» (при «искусственном свете» и «отсутствии света») субъектов использовались при тестировании для вычисления FRR. Образы из категории «Злоумышленники» использовались для оценки FAR. После чего вычислялся коэффициент EER. Данная процедура повторялась 10 раз и каждый раз испытуемые делились на две категории случайным образом.

Описанная процедура повторялась при различных параметрах минимальной информативности признаков [6], рассчитываемой по формуле:

$$I_j = -\log_2(AUC(\Phi_G(a_j), \Phi_I(a_j))), \quad (1)$$

где  $AUC$  — площадь (area under curve), ограниченная функциями плотности вероятности (ФПВ) «Свой»  $\Phi_G(a_j)$  и «Чужие»  $\Phi_I(a_j)$ , а также осью абсцисс.  $\Phi_G(a_j)$  характеризует значения признака строго для определенного класса образов,  $\Phi_I(a_j)$  характеризует значения этого же признака для всех классов образов в целом [6].

Помимо информативности, изменялись число входов нейронов НПБК ( $n$ ) и количество нейронов НПБК ( $N$ ). Длина кода на выходе НПБК равна  $N$ , так как каждый нейрон продуцирует один бит ключа. Все признаки, информативность которых ниже  $I_{min}$  не учитывались при синтезе и обучении НПБК. Отметим, что информативность признаков для

каждого субъекта различна, поэтому для каждого пользователя набор признаков отличается при  $I_{min} > 0$ .

Наилучшие результаты EER = 0,27% достигаются при  $I_{min} = 1$ ,  $n = 4$ ,  $N = 128$ . При  $I_{min} = 0$  используются все признаки, однако многие из них являются шумовыми для отдельных субъектов и не несут полезной информации. Значение  $I_{min} = 1$  оптимально, поскольку в этом случае неинформативные признаки отсеиваются и не используются при обучении и распознавании пользователей. Дальнейшее тестирование показало, что при  $I_{min} > 1$  вероятность ошибки возрастает, что означает, что отсеиваются уже полезные признаки. Наименьшее количество входов нейрона дает меньшие показатели EER, однако дальнейшее снижение  $n$  может негативно сказаться на безопасности биометрического шаблона. Длина ключа, равная 256 бит, достаточна для практических целей, при таком числе нейронов достигаются лучшие результаты.

## V. Заключение

Защищённое исполнение искусственного интеллекта в задачах классификации концептуально может быть построено по принципу преобразователя распознаваемых (классифицируемых) образов в длинный криптографический ключ, который можно ассоциировать с определенным управляющим воздействием. Для реализации такой концепции необходимо разделить функционал искусственного интеллекта на блоки детекции лиц и выделения признаков и блок защищенного исполнения.

В случае лицевой биометрии эффективной реализацией первой части может выступать сверточная нейронная сеть, либо их последовательность, как было продемонстрировано в работе. В свою очередь, наиболее эффективными с точки зрения реализации блока классификации и защиты биометрических данных являются нейросетевые преобразователи «биометрия-код», которые позволяют не только обеспечивать защиту биометрических данных субъектов верификации, но и демонстрируют высокую робастность обучения в сочетании с малыми значениями ошибок первого и второго рода.

Работа выполнена ОмГТУ в рамках государственного задания Минобрнауки России на 2023-2025 годы (тема №FSGF-2023-0004).

## Библиографический список

1. Jie Wang and Zihao Li. Research on Face Recognition Based on CNN // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 170. 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/170/3/032110.
2. Kaipeng Zhang, Zhanpeng Zhang, Zhifeng Li, Yu Qiao. Joint Face Detection and Alignment using Multi-task Cascaded Convolutional Networks // Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). 2016. DOI: 10.1109/LSP.2016.2603342.
3. ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. – М.: Стандартинформ, 2013.
4. Shuo Yang, Ping Luo, Chen Change Loy, Xiaoou Tang. Wider Face: A Face Detection Benchmark. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1511.06523.
5. Wayne Wu<sup>1</sup>, Chen Qian, Shuo Yang, Quan Wang, Yici Cai, Qiang Zhou. Look at Boundary: A Boundary-Aware Face Alignment Algorithm. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1805.10483.
6. Sulavko A. E., Samotuga A. E., Stadnikov D. G., Pasenchuk V. A., Zhumazhanova S. S. Biometric authentication on the basis of electroencephalograms parameters // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. III International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update", 23-24 April. 2019. 3. 022011. DOI:10.1088/1742-6596/1260/2/022011.



Дата поступления статьи: 30.03.2023  
Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023  
Дата принятия к публикации: 19.06.23

© А. Е. Сулавко, И. Е. Панфилова, 2023

УДК 004.051, 519.217.2

Е. К. Титова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДО ОТКАЗА БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МАРКОВСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

**Аннотация.** В статье рассматривается марковская модель, имеющая переменный параметр интенсивности возникновения компьютерных атак. Представлены результаты сравнения поведения системы в зависимости от заданных входных параметров в программе WolframMathematica.

**Ключевые слова:** Время до отказа безопасности, марковская цепь с непрерывным временем, метрика безопасности.

### I. Введение

Важной проблемой в современном мире является обеспечение информационной безопасности. Однако, одной из наиболее приоритетных задач информационной безопасности можно считать оценку эффективности систем защиты информации. В качестве примера решения данной задачи рассмотрим стохастическое моделирование и основанное на нем использование метрик безопасности. Метрики безопасности – это ключевые количественные показатели эффективности, помогающие оценить степень защищенности моделируемой системы от атак [1]. В работе [2] в качестве такой метрики безопасности предлагается использовать «время до отказа безопасности». Нами также была использована данная метрика для оценки эффективности системы защиты информации, однако, наше исследование предполагает использование в качестве входных данных переменную интенсивность потока атак.

### II. Описание модели

Рассмотрим компьютерную систему, граф состояний которой, изображен на рис. 1.

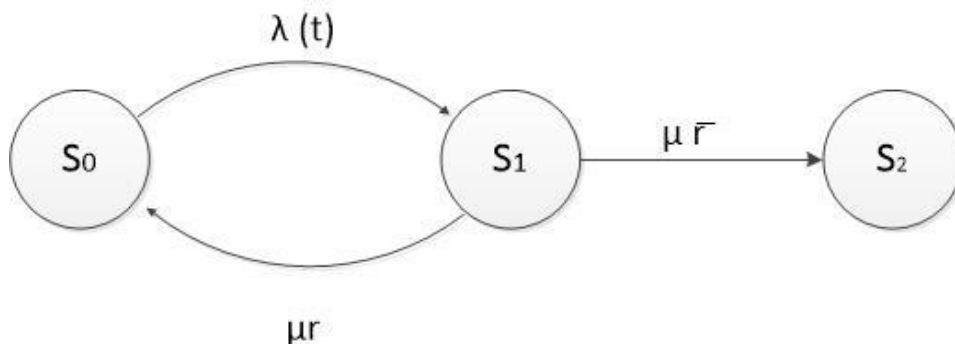


Рис. 1. Граф состояний системы

Рассматриваемая система имеет следующие состояния:

$s_0$  – безопасное состояние, в котором система не подвергается ни одной из атак;

$s_1$  – состояние, в котором на систему направлена атака;

$s_2$  – состояние отказа безопасности, то есть состояние, в которое переходит система в случае успешной реализации атаки. Состояние  $s_2$  будем считать финальным состоянием системы, при попадании в которое, система остается в нем навсегда.

Полное описание моделируемой системы заключается в вычислении вероятностей ее состояний в момент времени  $t$  [3]. Для точного определения вероятностей состояний системы требуется задать их значения в начальный момент времени  $t = 0$ . Для этого накладываем следующее условие:

$$p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = 0 \quad (1)$$

Условие (1) говорит о том, что в начальный момент времени  $t = 0$  система находится в безопасном состоянии  $s_0$  и не подвергается ни одной из атак.

Для определения вероятностей в любой момент времени  $t$  необходимо воспользоваться решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка – уравнений Колмогорова, согласно формуле (2):

$$\frac{dp(t)}{dt} = p(t) \cdot \Pi, \quad (2)$$

где  $p(t) = (p_0(t), p_1(t), p_2(t))$  – вероятности состояний системы в момент времени  $t$ ,  $\Pi$  – матрица переходных состояний системы, которая в нашем случае имеет вид:

$$\Pi = \begin{pmatrix} -\lambda(t) & \lambda(t) & 0 \\ \mu r & -\mu & \mu \bar{r} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\lambda(t)$  – переменная интенсивность потока атаки,  $\mu$  – интенсивность потока отражения атаки,  $r$  и  $\bar{r}$  – вероятности отражения и не отражения атаки соответственно. Данные параметры подчиняются следующим очевидным требованиям:

$$\lambda(t) \geq 0, \quad \mu \geq 0, \quad 0 \leq r \leq 1. \quad (4)$$

Используя граф переходов системы, изображенный на рис. 1, построим систему уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda(t)p_0(t) + \mu r p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda(t)p_0(t) - \mu p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \mu \bar{r} p_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

### III. Время до отказа безопасности

В качестве метрики безопасности для оценки эффективности системы защиты информации в компьютерной системе, описанной в разделе II настоящей статьи, мы предлагаем использовать *время до отказа безопасности*  $T$ . Время до отказа безопасности  $T$  – это время, прошедшее с момента времени  $t = 0$ , когда компьютерная система находилась в состоянии безопасности  $s_0$ , до момента ее попадания в состояние отказа безопасности  $s_2$ .

Ясно, что  $T$  является непрерывной случайной величиной, функция и плотность распределения которой определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} F_T(t) &= p_2(t); \\ f_T(t) &= F_T'(t); \\ f_T(t) &= p_2'(t) = \mu\bar{r}p_1(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Значение функции распределения времени до отказа безопасности  $F_T(t)$  в момент времени  $t$  будет равно вероятности нахождения системы в состоянии  $S_2$ , соответственно значение функции плотности распределения времени до отказа безопасности будет равно производной вероятности нахождения системы в состоянии отказа безопасности.

Одной из числовых характеристик функции распределения времени до отказа безопасности  $F_T(t)$  является математическое ожидание – это *среднее время до отказа безопасности*  $\tau$ . Данная характеристика позволяет сделать выводы о достаточности или, наоборот, избыточности средств защиты, используемых в компьютерной системе, а также, характеризует сколько в среднем проработает система защиты при заданных входных параметрах. В соответствии с определением математического ожидания, среднее время до отказа безопасности будет равно:

$$\tau = \int_0^{\infty} f_T(t) t dt = \mu\bar{r} \int_0^{\infty} t p_1(t) dt. \quad (7)$$

Таким образом, для вычисления  $\tau$  нужно знать явное выражение для функции  $p_1(t)$ . Однако, в нестационарном случае явное решение уравнений Колмогорова затруднительно, поэтому будем вычислять эту величину численно. Для этого рассмотрим следующую функцию:

$$\tau(t) = \mu\bar{r} \int_0^t x p_1(x) dx. \quad (8)$$

Производная от этой функции определяется следующим выражением:

$$\frac{d\tau}{dt} = \mu\bar{r} t p_1(t), \quad (9)$$

следовательно, вместо системы уравнений Колмогорова (5) мы можем рассмотреть следующую систему, которая автоматически определяет функцию  $\tau(t)$ :

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda(t)p_0(t) + \mu r p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda(t)p_0(t) - \mu p_1(t) \\ \frac{d\tau}{dt} = \mu\bar{r} t p_1(t) \end{cases} \quad (10)$$

Начальное условие для этой системы следующее:

$$p_0(0) = 1, p_1(0) = \tau(0) = 0. \quad (11)$$

В итоге, среднее время до отказа безопасности будет вычисляться как предел функции  $\tau(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ .

#### IV. Расчет времени до отказа безопасности

Для численного решения системы уравнений (10) воспользуемся программой WolframMathematica. При этом в качестве функции  $\lambda(t)$  выберем простейшую гармоническую функцию вида:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \epsilon \cdot \sin(\omega t) \quad (12)$$

где  $\lambda_0$  – средняя интенсивность атак,  $\epsilon$  – амплитуда колебаний интенсивности,  $\omega$  – частота колебаний интенсивности. Скрипт на языке WolframMathematica, решающий данную задачу, имеет следующий вид:

```
Clear[μ, r, λ, ω, ε];
μ = 2; r = 0.85; ε = 0.1; ω = 1;
λ₀ = 1;
λ[t_] := λ₀ + ε Sin[ω t];
Eqs = {
  p₀'[t] == -λ[t] p₀[t] + μ r p₁[t],
  p₁'[t] == λ[t] p₀[t] - μ p₁[t],
  τ'[t] == t μ (1 - r) p₁[t],
  p₀[0] == 1,
  p₁[0] == 0,
  τ[0] == 0
};
tmax = 100000;
S = NDSolve[Eqs, {p₀[t], p₁[t], τ[t]}, {t, 0, tmax}];
Table[{τ[t]} /. S, {t, tmax, tmax}][[1][1][1]]
```

Рис. 2. Скрипт программы

Рассмотрим два случая работы программы.

**Эксперимент № 1.** При входных данных  $\lambda_0 = 1, \omega = 1, \mu = 2, r = 0.85$  и изменениях параметра амплитуды колебаний интенсивности в пределах  $0 \leq \epsilon < 1$ , получаем следующий график зависимости среднего времени до отказа безопасности от значения  $\epsilon$ :

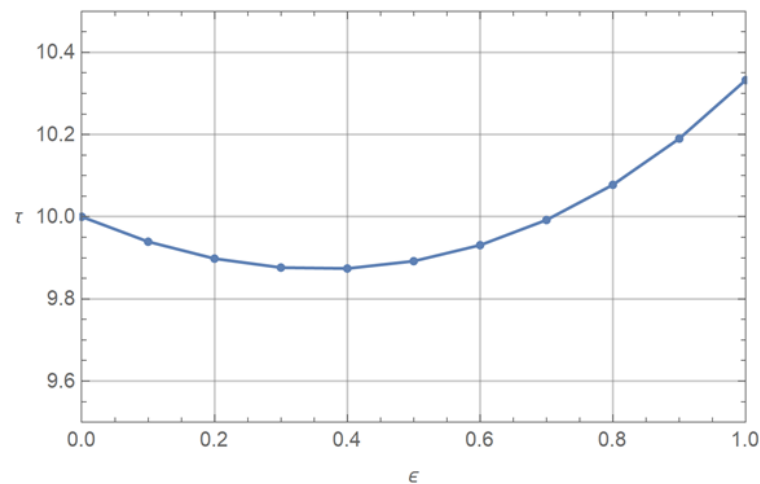


Рис. 3. Среднее время до отказа безопасности для входных параметров  $\lambda_0 = 1$ ,

$$\omega = 1, \mu = 2, r = 0,85, 0 \leq \epsilon < 1$$

**Эксперимент № 2.** При входных данных  $\lambda_0 = 1, \epsilon = 0,5, \mu = 2, r = 0,85$  и изменениях параметра амплитуды колебаний интенсивности в пределах  $0 \leq \omega < 5$ , получаем следующий график зависимости среднего времени до отказа безопасности от значения  $\omega$ :

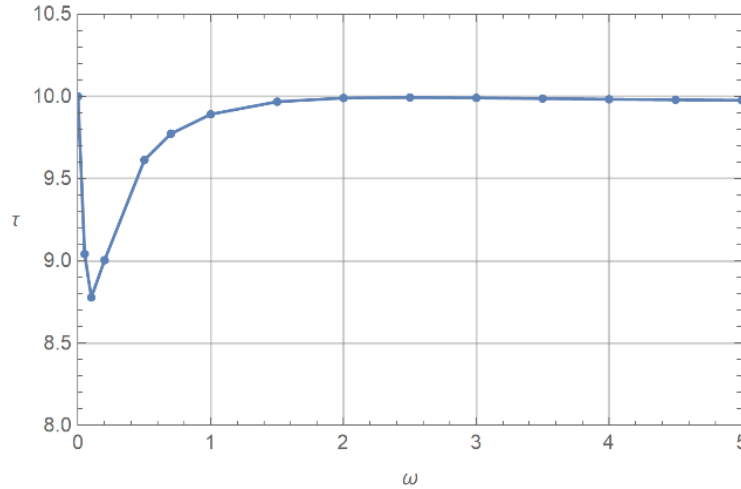


Рис. 4. Среднее время до отказа безопасности для входных параметров  $\lambda_0 = 1, \epsilon = 0,5, \mu = 2, r = 0,85, 0 \leq \omega < 5$

Для оценки изменения среднего времени до отказа безопасности нестационарного марковского потока воспользуемся формулой относительной погрешности:

$$\Delta \tau = \frac{|\tau - \tau_0|}{\tau_0} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где  $\tau$  – среднее время до отказа безопасности нестационарного марковского потока,  $\tau_0$  – среднее время до отказа безопасности стационарного марковского потока.

Для первого эксперимента  $\Delta \tau = 3,325 \%$ , а для второго эксперимента  $\Delta \tau = 12,2158 \%$ .

#### IV. Заключение

1. Изменения амплитуды колебаний интенсивности меняет среднее время до отказа безопасности, но не значительно (порядка 2-4% от стационарного случая).

2. При малых частотах колебаний интенсивности атак среднее время до отказа безопасности уменьшается на десятки процентов по сравнению со стационарным случаем. При больших частотах – отклонений от стационарного случая практически нет. То есть, увеличение частоты атак не понижает уровень защищенности системы.

Научный руководитель: Горохова Валерия Федоровна, Омский государственный технический университет.

#### Библиографический список

1. Pendleton M. et al. A survey on systems security metrics // ACM Computing Surveys (CSUR). 2016. Т. 49. №. 4. С. 1–35.

2. Магазев А. А., Мельникова А. С., Цырульник В. Ф. Оценка среднего времени до отказа безопасности на основе марковских цепей с непрерывным временем. // Математические структуры и моделирование. 2020. № 4 (56). С. 112–125. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.112-125.

3. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 2001. 343 с..

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. К. Титова, 2023

УДК 004.021

*В. С. Шабанов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ ПРАВИЛ НОРМАЛИЗАЦИИ И КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ SIEM-СИСТЕМ И ЕГО АПРОБАЦИЯ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены этапы обработки событий информационной безопасности (ИБ) в SIEM-системах, выработан алгоритм разработки правил нормализации и корреляции событий ИБ, как двух основных этапов обработки информации, приведен практический пример разработки правил на основе выработанного алгоритма.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, SIEM, нормализация, корреляция, обработка данных.

### **I. Введение**

Проблема количества информации, обрабатываемой в информационных системах, объемы которой постоянно растут из-за развития бизнес-процессов и задач, решаемых различными организациями, является актуальной на сегодняшний день. Вместе с этим, увеличивается и количество вредоносной информации, такой как вирусы, троянские программы и т.д., а также разнообразие злоумышленных информационных атак на ресурсы систем. Целесообразным инструментом для решения данных проблем может стать SIEM (System information event management) – система управления информационной безопасностью и событиями безопасности.

SIEM выполняет непрерывный мониторинг информационной безопасности IT-инфраструктуры организации. Мониторинг осуществляется путем сбора событий с источников и отслеживания состояния активов.

Источником событий может являться любой элемент IT-инфраструктуры, для которого настроены журналирование и сбор событий.

Для обнаружения событий информационной безопасности, в большинстве SIEM-систем, используется метод rule-based reasoning. Эксперты заранее создают правила, описывающие признаки события. Событие информационной безопасности фиксируется, если в потоке событий от источников появляется событие или их последовательность, указанное в одном из правил, или фиксируется изменение состояния актива, описанное в одном из правил. В SIEM существуют несколько этапов обработки информации, которые работают на основе правил – нормализация, агрегация, обогащение и корреляция. Не все системы поддерживают агрегацию событий и не всегда события обогащаются, поэтому в

данной статье будет рассмотрен алгоритм разработки правил для нормализации и корреляции.

## II. Постановка задачи

Цель данной научной статьи – выработать алгоритм разработки правил нормализации и корреляции для SIEM-систем. Для достижения этой цели необходимо:

1. изучить существующую литературу и документацию по теме обработки информации в SIEM-системах;
2. провести исследование о используемых методах разработки правил в различных SIEM-системах;
3. на практическом примере проверить работоспособность алгоритма.

## III. Алгоритм разработки правил нормализации и корреляции

Разработка правил нормализации и корреляции – это поэтапный процесс, без которого SIEM-система лишается практически всех своих возможностей. Для написания правил был выработан алгоритм (рис. 1), который предполагает последовательное выполнение операций над полученными событиями из различных источников.

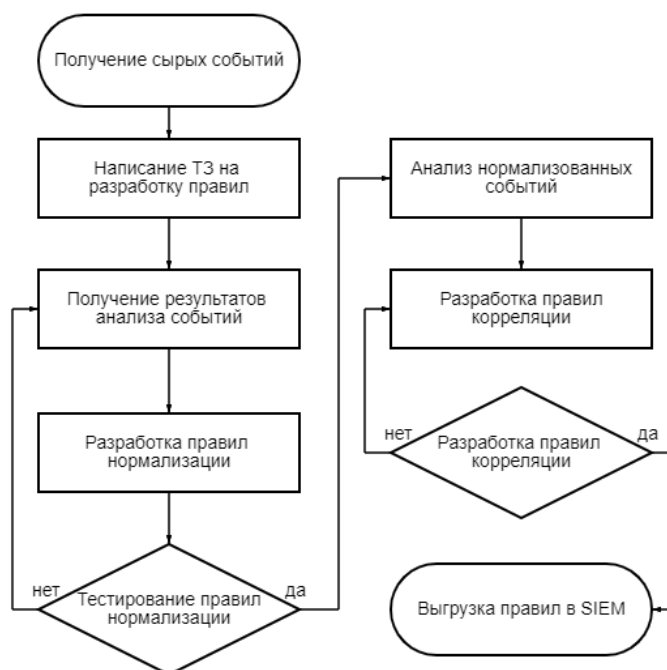


Рис. 1. Алгоритм разработки правил нормализации и корреляции

Рассмотрим каждый этап в отдельности:

### 1. Получение сырых событий

Сырое событие (raw-событие) – это определенное текстовое событие, которое формируется источником и загружается в дампы. Чтобы получить сырые события из дампа событий в «конвертах» необходимо воспользоваться специальной утилитой.

### 2. Написание технического задания на разработку правил

Составление технического задания позволяет разработчику понять, что необходимо от него при написании формул для конкретного источника. В первую очередь в документе указывается, какие данные необходимо получить из дампа событий. При необходимости извлечь данные из конвертов указывается этот пункт. Также указывается ссылка на

документацию источника, в которой можно изучить, как формируются события и что в них указано. Последнее, что указывается в техническом задании – сроки выполнения работы.

### 3. Получение результатов анализа событий

Данный этап можно назвать главным во всей цепочке, по которой создается правило нормализации, ведь именно благодаря ему разработчик понимает, когда событие генерируется, какого вида могут быть события из определенного источника, какие полезные, именно с точки зрения информационной безопасности, поля может генерировать источник [2].

Вначале указывается описание произошедшего события, затем предоставляется пример «сырого» события. В самом «сыром» событии выделяются поля, которые при помощи правила нормализации нужно будет получить в обязательном порядке. Примером таких полей могут быть имя машины, IP-адреса источника и целевого устройства при сетевом взаимодействии, имя аккаунта, который связан с подозрительной активностью, полный путь к файлу, который является источником генерации события безопасности.

После выделения ключевых полей идет процесс их описания. В данном случае, это могут быть формат поля, его контекст, возможность принимать то или иное значение.

Последним и одним из важных элементов разбора является написание локализации события информационной безопасности. Как правило, в отечественных SIEM системах события локализуются на двух языках – русский и английский. В локализации указывается краткое описание события, благодаря которому оператор системы управления информационной безопасностью сможет определить, какая реакция от него требуется на ту или иную активность в системе, в которой проводится мониторинг.

После описания всех необходимых полей анализ можно считать проведенным. Вся информация передается разработчику, который в свою очередь приступает к процессу написания правила нормализации.

### 4. Разработка правил нормализации

При создании формул нормализации для событий, относящихся к различным категориям, рекомендуется придерживаться определенных правил заполнения полей.

При разработке правил нормализации требуется иметь в виду несколько важных моментов. Чтобы специалисты по расследованию инцидентов и ответственные за разработку правил корреляции однозначно трактовали нормализованные события, схема должна удовлетворять основным свойствам:

- быть унифицированной для событий любого типа и источников;
- четко описывать, кто с кем и как взаимодействовал;
- сохранять суть и контекст взаимодействия.

В процессе разработки правил нормализации информацию о взаимодействии необходимо найти в исходном событии и разложить ее в специально отведенные поля. То же самое необходимо сделать с контекстом и сутью взаимодействия [3].

### 5. Тестирование правил нормализации

Тестирование правил нормализации может производиться в специальной утилите для разработки правил либо напрямую при сборе событий на развернутой системе.

### 6. Анализ нормализованных событий.

Анализ нормализованных событий намного проще, чем анализ изначально полученных, так как все необходимые поля уже получены из «сырого» события и разложены по полям таксономии. Но при этом эксперту все еще необходимо определить какие объекты и субъекты участвуют в формировании инцидента информационной безопасности. Главное на данном этапе определить причинно-следственные связи между поступающими на обработку событиями.

### 7. Разработка правила корреляции

На основе всей проведенной аналитической работы специалист создает правило.



## 8. Тестирование правила корреляции

Тестирование правил может производиться с использованием развернутого стенда, на котором воспроизводятся предполагаемые действия, для которого правила были прописаны.

## 9. Выгрузка правил в базу знаний SIEM

Для того, чтобы правила начали работать в системе их необходимо выгрузить в общую базу знаний. В базе знаний объединены правила, которые предоставляются и обновляются вендором и те правила, которые отдельно разрабатываются под каждую организацию.

## IV. Пример применения алгоритма

Практический пример разработки правил будет рассмотрен на примере MaxPatrol SIEM – отечественном продукте, компании Positive Technologies. Для разработки правил нормализации будет использоваться утилита Правила нормализации, корреляции и обогащения событий для MaxPatrol SIEM разрабатываются на языке eXtraction and Processing (XP). Язык очень похож на скриптовый язык Python, имеет схожую структуру, синтаксис и функции.

Возьмем события входа пользователя по SSH и событие чтения конфигурационного файла операционной системы, которые имеют следующий вид:

```
<134>Sep 22 05:01:48 Message forwarded from sovma131: audit: USER_Login root OK sshd user: ektest tty: ssh  
<134>Sep 22 04:54:46 audit: USER_Login root OK sshd user: ektest tty: ssh
```

Рис. 2. События входа пользователя по SSH

```
May 19 09:50:06 aix53 local0:info audit: OS_CONF_READ mp OK cat audit object read event detected /etc/shadow  
Jun 3 00:10:05 local0:info audit: OS_CONF_READ mp OK cat audit object read event detected /etc/ssh/ssh_config
```

Рис. 3. События чтения конфигурационного файла

Этап написания технического задания опустим, предположим, что мы его получили вместе с дампом событий. Сразу приступим к анализу событий.

Для начала выделим те данные, которые мы сможем получить из исходных событий:

Таблица 1

Данные из события входа пользователя по SSH

Фрагмент данных	Суть	Поле
Sep 22 05:01:48	Дата и время наступления события	time
sovma131	Имя узла-источника события	event_src.hostname
USER_Login	Уникальный идентификатор события	msgid
ektest	Имя пользователя	subject.account.name
ssh	Протокол передачи данных	protocol.layer7
“OK”, “FAIL”, “FAILURE”	Показатель того, было ли действие успешным	datafield1

После определения необходимых данных и разбиения их по полям, можно рассмотреть к локализации. Событие будет прописано на двух языках. Также следует напомнить, что мы фиксируем события, где указана машина-источник события и, где этой информации нет. Таким образом, локализация будет иметь следующий вид:

- Русский язык:
  1. Пользователь {subject.account.name} прочитал конфигурационный файл операционной системы, хранящийся по пути {object.storage.fullpath}
  2. Пользователь {subject.account.name} прочитал конфигурационный файл операционной системы, хранящийся по пути {object.storage.fullpath} на хосте {event\_src.hostname}
- Английский язык:
  1. User {subject.account.name} has read the OS configuration file stored in {object.storage.fullpath}
  2. User {subject.account.name} has read the operating system configuration file stored on the path {object.storage.fullpath} on the host {event\_src.hostname}

Поля, указанные в фигурных скобках, будут заменены значениями, которые в них хранятся.

Затем правило отправляется на разработку, после того как оно готово, отправляется на тестирование. Результатом будет отображение событий в таком же виде, в каком их увидит оператор SIEM-системы. Итог тестирования на скриншоте (рис. 4).

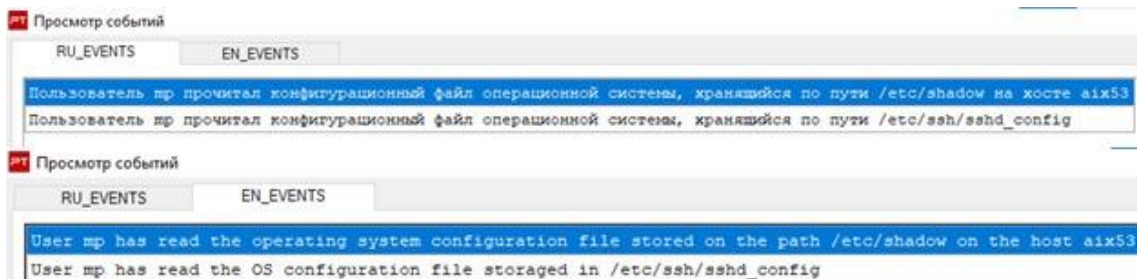


Рис. 4. Тестирование правила входа в систему

Со следующим типом событий проведем те же действия. Выбираем необходимые данные.

Таблица 2

**Данные из события чтения конфигурационного файла**

Фрагмент данных	Суть	Поле
May 19 09:50:06	Дата и время наступления события	time
aix53	Имя узла-источника события	event_src.hostname
OS_CONF_READ	Уникальный идентификатор события	msgid
cat	Имя приложения, использованного для чтения	subject.process.name
/etc/shadow	Полный путь к файлу, который читали	object.storage.fullpath
mp	Имя пользователя	subject.account.name
“OK”, “FAIL”, “FAILURE”	Показатель того, было ли действие успешным	datafield1

- Русский язык:
  1. Пользователь {subject.account.name} прочитал конфигурационный файл операционной системы, хранящийся по пути {object.storage.fullpath}
  2. Пользователь {subject.account.name} совершил неудачную попытку чтения конфигурационного файла операционной системы, хранящегося по пути {object.storage.fullpath}

- Английский язык:
  1. User {subject.account.name} has read the OS configuration file stored in {object.storage.fullpath}
  2. User {subject.account.name} made an unsuccessful attempt to read the OS configuration file stored in {object.storage.fullpath}

Переменные в фигурных скобках будут заменены значениями, которые в них хранятся.

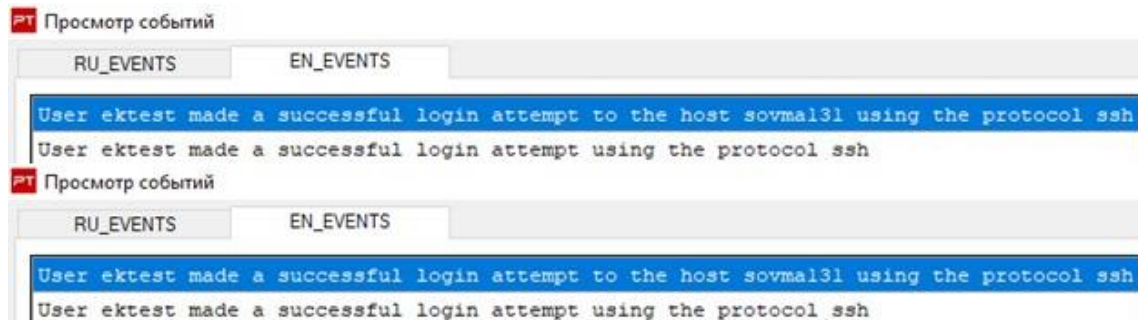


Рис. 5. Тестирование правила чтения файла

Из данных событий можем получить инцидент информационной безопасности: *Пользователь сначала прочитал файл /etc/shadow, после чего успешно вошел в систему под другим пользователем, оба события произошли в течение 5 минут.*

Выделим ключевые поля, которые помогут определить соблюдены ли все условия для того, чтобы событие скоррелировали.

Таблица 3

**Поля, используемые в условии корреляции**

Поле	Обоснование необходимости
event_src.hostname	Позволяет понять, что в обоих событиях используется одна машина
time	Позволяет определить сколько времени прошло между двумя событиями
subject.account.name	Позволяет отследить был ли вход под другой учетной записью
object.storage.fullpath	Позволяет определить какой именно конфигурационный файл был прочитан

Пропишем локализацию корреляционного события.

- Русский язык

Пользователь {subject.account.name} после прочтения конфигурационного файла /etc/shadow осуществил вход по протоколу {protocol.layer7}, используя учетную запись {subject.account.fullname}

- Английский язык

User {subject.account.name } after reading the configuration file /etc/shadow logged in via {protocol.layer7} using the account {subject.account.fullname}

Далее можно приступать к разработке заключительного правила в практической части – правила корреляции и его тестированию. В результате выполнения данной работы будут получены следующие результаты:

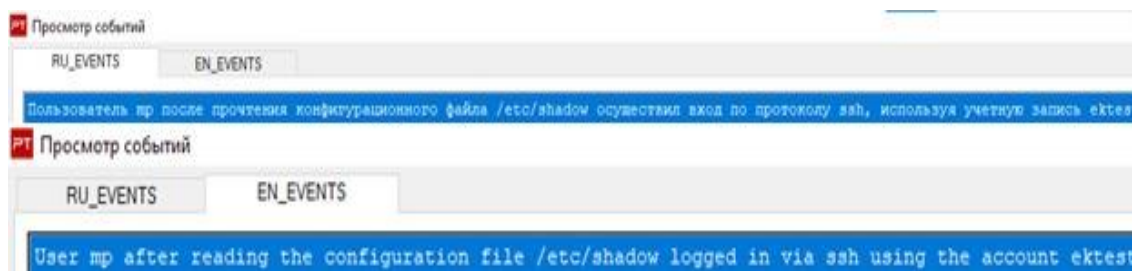


Рис. 6. Тестирование правила корреляции

## У. Выводы и заключения

Алгоритм разработки правил нормализации и корреляции должен позволить специалистам более точно, быстро и грамотно выполнять объем работ, изложенный в статье. Упорядочивание процесса позволяет привлекать к работе менее опытных специалистов, которым только предстоит изучить основы работы с SIEM-систем и более глубоко вникнуть в продукт поэтапно пройдя весь процесс от разработки до использования непосредственно места оператора SIEM.

Научный руководитель: Данилова Ольга Тимофеевна, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Positive Technologies. Руководство разработчика MaxPatrol SIEM. – 5-изд. М.: 2022. 367 с.
2. Глубины SIEM: корреляции «из коробки». Часть 3.2. Методология нормализации событий. URL: <https://habr.com/ru/company/pt/blog/433606/> (дата обращения: 13.03.2023)
3. Глубины SIEM: корреляции «из коробки». Часть 2. Методология нормализации событий. URL: <https://habr.com/ru/company/pt/blog/424975/> (дата обращения: 13.03.2023)
4. Москвичев А. Д., Долгачев М. В. Алгоритмы корреляции событий информационной безопасности // Автоматизация процессов управления. 2020. №3 (61). С. 50–59.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. С. Шабанов, 2023

*Под редакцией М. И. Минеевой*

УДК 004.421: 621.396.67: 621.37

*А. В. Аганитов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ СО ВСТРОЕННЫМИ РСВ-АНТЕННАМИ**

**Аннотация.** В статье описана разработка лабораторного стенда, предназначенного для изучения поведения микропроцессорных устройств, имеющих встроенные РСВ-антенны сверхвысоких частот. Стенд выполнен в виде аппаратной и программной частей.

**Ключевые слова:** СВЧ, Wi-Fi, Bluetooth, микроконтроллеры, радиоволны, РСВ-антенны.

### **I. Введение**

В настоящее время широкую популярность на рынке микропроцессорных устройств набирают устройства со встроенными РСВ-антеннами (Printed Circuit Board, т. е. на печатных платах) [1–3]. Одним из таких устройств является мощный микроконтроллер ESP8266, различные модули которого содержит в себе инвертированные F-антенные конструкции для имплементации технологий беспроводной сети Wi-Fi 802.11 b/g/n и Bluetooth: v4.2 BR/EDR/BLE (Basic Rate, Enhanced Data Rate, Bluetooth Low Energy соответственно).

Подобные устройства широко применяются в промышленности и проектах типа «умный дом», поскольку не обязывают пользователя дополнительно реализовывать конструкции антенн и, как правило, обладают повышенными мощностями для обработки информации [2–4].

### **II. Постановка задачи**

С помощью разработанного стенда у студентов имеется возможность изучить процесс программирования, настройки, отладки микропроцессорных устройств, имеющих в своем составе интерфейс для беспроводной связи, в том числе РСВ-антенн. Для этого в стенде существует экран ИЛ9341, отображающий любую необходимую информацию. Под микропроцессорными устройствами со встроенными РСВ-антеннами [3, 4] понимается микропроцессор со встроенной периферией (микроконтроллер), в концепцию которого заложено взаимодействие с высокочастотными сетями посредством антенны на плате.

Микроконтроллер ESP8266, используемый в стенде, самодостаточен, легко программируется как Arduino (то есть это C++ и среда Arduino IDE), но есть возможность программирования через более низкоуровневую среду Espressif IDE; имеет в своем составе Wi-Fi, компактный и есть множество модификаций под различные нужды. К ESP8266 можно подключать разные датчики и исполнительные устройства по таким протоколам как 1-Wire, I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface) [1].

Любой датчик или устройство по кабелям подключается к ESP8266, который, в свою очередь, подключается по Wi-Fi к нужному серверу или хосту [2]. Сервер можно писать на любом языке, например, на платформе NodeJS, что добавляет универсальности реализованному стенду [1–5].

Аппаратная часть представляет собой черный корпус для радиоэлектронной аппаратуры, внутри которого находится отлаженная конструкция с экраном ИЛ9341,

подключенным по протоколу SPI, автономным питанием от Li-Ion аккумулятором емкостью 550 мА (бесперебойная работа ~5 часов) и самим модулем ESP8266 NodeMCU Lolin v3.

Так же в конструкции стенда присутствует повышающий преобразователь напряжения MT3608 (для ESP8266 требуется 5-вольтовое питание) и плата контроля заряда аккумулятора TP4056.

Для подключения датчиков или других сенсорных цифровых устройств соединение крышки корпуса и его тела реализовано как разборное, следовательно, получить доступ к GPIO (General-Purpose Input/Output) выводам микроконтроллера можно сравнительно просто.

Корпус снабжен двумя разъемами: один для программирования и один для зарядки стенда. Программирование микроконтроллера осуществляется стандартным кабелем USB Type-A to USB Micro-B по распространенному протоколу UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Изображение стенда представлено на рис. 1.

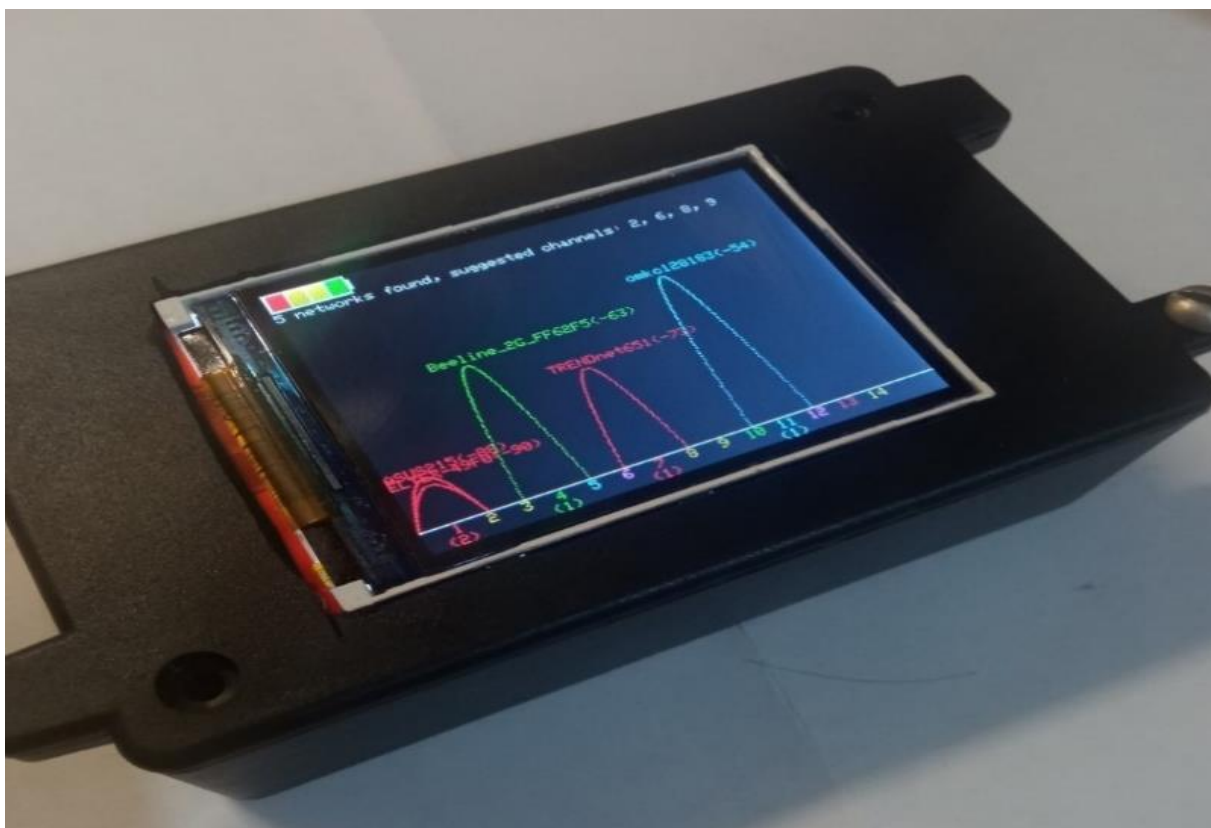


Рис. 1. Аппаратная составляющая лабораторного стенда с демонстрационным проектом

В качестве демонстрационного проекта было написано программное обеспечение для анализа Wi-Fi сетей: при включении устройства в течение 5 секунд сканируется окружающее пространство и инициализируется экран. После сканирования на экране рисуются параболы с названиями сетей, их мощностями относительно стенда в дБм распределением по каналам, а также батарея с четырьмя ячейками, отображающими заряд аккумулятора. Размер парабол так же зависит от мощности сети. Внешний вид отсканированного пространства показан на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 3 видно, что на первом канале находится одновременно 4 сети, в то время как каналы 3, 4, 6, 7 и 11 являются свободными, следовательно, сети в окружающем пространстве можно разгрузить и ускорить, изменив настройки в точке доступа Wi-Fi.



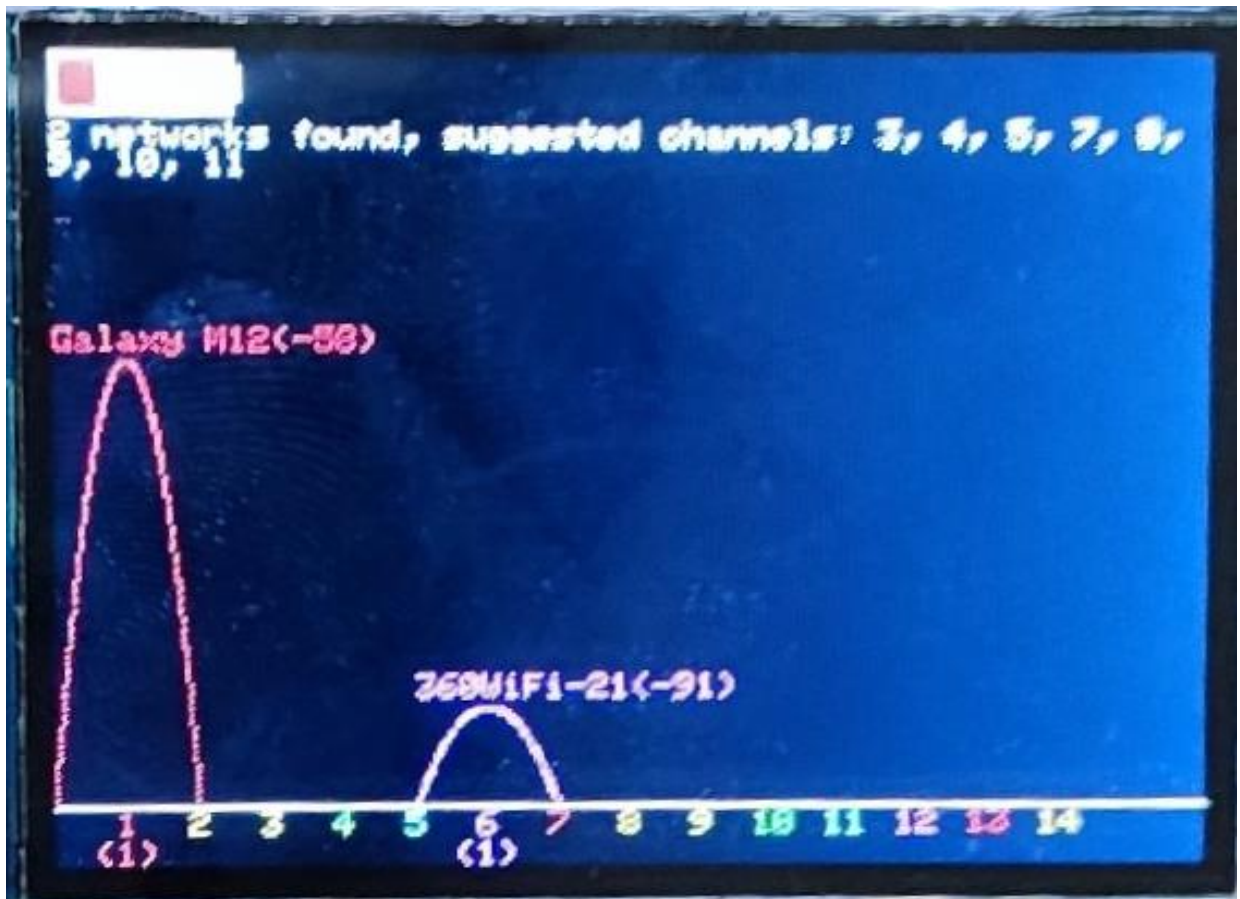


Рис. 2. Программная составляющая лабораторного стенда.  
Экран с отсканированными сетями

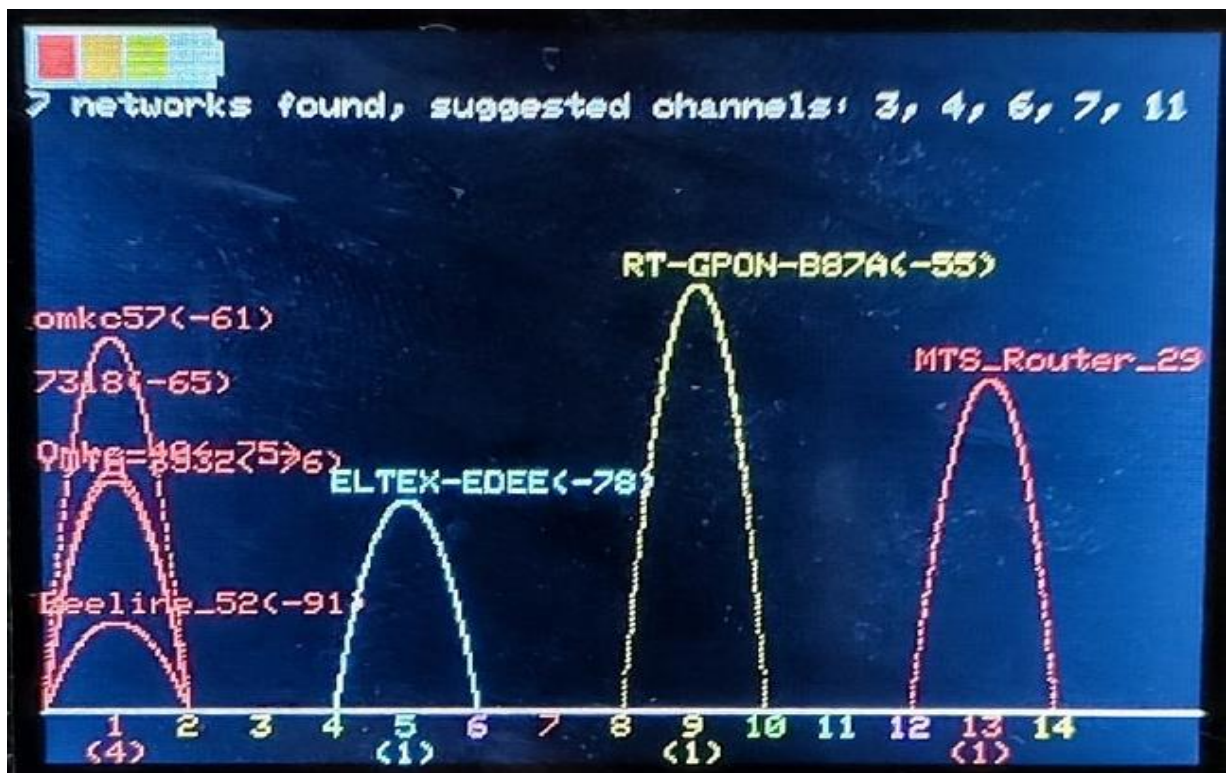


Рис. 3. Экран с большим количеством отсканированных сетей

### III. Заключение

Данный стенд позволяет реализовать практически весь спектр задач локальной беспроводной связи. Так, разработанное устройство может модифицироваться с целью подключения тех или иных датчиков и/или сенсоров и последующей передачи показаний на удаленный сервер. Наличие экрана и встроенной батареи расширяет область применения такого стенда, позволяя проводить отладку тех или иных модулей беспроводной сети гораздо более комфортно.

Научный руководитель: проф., д.т.н., Богачков Игорь Викторович, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

7. Абдрахманов В. Х., Важаев К. В., Салихов Р. Б. Разработка средств автоматизации с использованием Wi-Fi модулей ESP8266 и Iwpan технологий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. №4. С. 98-108.
8. Моисеев Д. Н. Беспроводной контроль научного оборудования и мониторинг датчиков по Wi-Fi с помощью модуля ESP8266 // Автоматика и программная инженерия. 2018. №1 (23). С 9-19.
9. Богачков И. В. Основы теории антенн: учеб. пособие : в 3 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. Ч. 1: Элементы теории антенн. 2021. 148 с.
10. Богачков И. В. Основы теории антенн: учеб. пособие : в 3 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. Ч. 2: Основные конструкции антенн различного назначения. 2021. 140 с.
11. Богачков И. В., Агапитов А. В. Разработка виртуальной лабораторной работы для изучения отражения и преломления волн на границе раздела сред // Сб. тр. XI Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2022. С. 515–516.

*Дата поступления статьи: 21.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. В. Агапитов, 2023

УДК 621.396.1

*Т.М. Баязитов, И. В. Никонов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### МОБИЛЬНЫЕ СЕТИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

**Аннотация.** В работе рассмотрены основные принципы реализации существующих технологий мобильных беспроводных сетей. Проведен сравнительный анализ различных технологий сетей четвертого поколения. Проведено оперативное моделирование мобильной сети четвертого поколения с применением пакетов прикладных программ.

**Ключевые слова:** LTE (Long-Term Evolution), стандарты связи, мобильная сеть, мобильная станция, базовая станция, программный комплекс.

### I. Введение

В настоящее время разработаны и применяются пять поколений мобильных (сотовых) систем и сетей связи. Проводятся первые исследования по частотному планированию



мобильных сетей шестого поколения. Различия сотовых систем и сетей связи разных поколений заключаются в применении новых телекоммуникационных технологий и стандартов, увеличивающих скорость и надежность передачи информации различного вида.

Основные положения стандартов разных поколений мобильной связи следующие:

- Аналоговые мобильные сети стандарта 1G были разработаны только для голосовой связи, причем, были реализованы основные принципы сотовой связи, но имелись существенные недостатки (низкая пропускная способность, отсутствие шифрования, отсутствие эффективных методов борьбы с замиранием сигнала при перемещении пользователя).

- Цифровые мобильные сети стандарта 2G (GSM - Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), EDGE (Enhanced Data rates for Evolution) обеспечили возможность цифровой передачи данных. Обеспечивалось шифрование, высокая пропускная способность сети, лучшая помехозащищенность (в стандарте EDGE применяется новая система кодирования, а в стандарте GPRS обеспечивается работа в интернете и в системах спутниковой связи).

- Цифровые мобильные сети стандарта 3G (UMTS - Universal Mobile Telecommunications System или W-CDMA - Wideband Code Division Multiple Access) обеспечили широкополосный доступ с кодовым разделением каналов (используются две широкие полосы по 5 МГц, что позволяет получить более высокую скорость передачи данных и обслуживать больше абонентов сети. Сети 3G позволяют устраивать видеоконференции, просматривать кино, видео и другое).

- Цифровые мобильные сети стандарта 4G (к ним обычно относят технологии LTE (Long-Term Evolution), LTE-Advanced (LTE Release 10), Wireless MAN-Advanced (WiMAX Release 2, т.е. IEEE 802.16m)) должны были применять технологии, обеспечивающие пиковую скорость передачи данных 100 Мбит/с и 1 Гбит/с, при движении абонентов и при стационарной связи, соответственно и должны быть совместимыми с сетями 1G, 2G. Первые LTE и WiMAX – сети не соответствовали этим требованиям по пропускной способности и применялись вначале как технологии некоторого улучшения сетей 3G (используя коммутацию пакетов данных)

- Цифровые мобильные сети 5G в России развернуты только на тестовых площадках в некоторых городах (и только на частотах 3-4 гигагерц), но уже и обеспечивают уверенную скорость передачи данных до 1-2 Гбит/с.

- Возможность развертывания мобильных сетей 6G, в которых будут использоваться более высокие частоты, чем в сетях пятого поколения, пока только исследуется.

## **II. Постановка задачи**

В работе решалась задача частичной модернизации сотовой сети населенного пункта городского типа, где у операторов сотовой связи уже были развернуты сети связи стандартов 3G и 4G. Количество жителей населенного пункта 64 000 тысячи человек, площадь населенного пункта 47 км<sup>2</sup>. Планировалось расширение сотовой сети 4G, для чего вначале выбиралась конкретная технология сети, затем проводилось аналитические расчеты и моделирование сети. Современные сотовые сети поколения 4G могут быть спроектированы на основе стандарта LTE-Advanced, или на основе Wireless MAN-Advanced (т.е. IEEE 802.16m)). Сравнивая характеристики мобильных сетей, которые можно обеспечить при применении этих отличающихся технологий, выбираем стандарт LTE-Advanced по следующим значимым критериям. (смысл термина «Long-Term Evolution» означает – «долгосрочная эволюция») [1].

- Для «линии вверх» – в восходящем канале, в LTE предложена технология SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) мультиплексирование на одной несущей, т.е. символы передаются параллельно, а не последовательно.
- В пределах одного ресурсного блока, 180 кГц коррелированы, что позволяет сократить количество пилот-поднесущих для оценивания канала на приемной стороне.
- Благодаря упрощенной архитектуре LTE (отсутствует контроллер базовых станций) сократилось время на обработку пакетов до 10 мс, против 30 мс в WiMax.
- Могут быть максимально учтены и адаптированы условия распространения в радиоканале путем выбора наиболее подходящей схемы модуляции и кодирования MCS (Modulation and Coding Scheme).
- В LTE доступны 29 схем MCS и выбирается та, которая в данных условиях распространения радиоволн обеспечивает максимальную пропускную способность.
- Работа сети LTE осуществляется с коэффициентом переиспользования частот 1 (у стандарта IEEE 802.16m такой коэффициент 3), т.е. все базовые станции работают на одной несущей, но при этом внутрисистемные помехи минимизируются благодаря гибкому частотному плану).
- Средняя пропускная способность соты 11,8 Мбит/с – UL (вверх, к базовой станции) и 4,8 Мбит/с – DL (вниз, от базовой станции), то есть, примерно в 3 раза больше, чем у технологии IEEE 802.16m.

Для проведения сетевого планирования сети LTE, в виде моделирования или расчета, необходимо сформулировать необходимые исходные данные, отражающие общие характеристики и требования к мобильной сети, например: разрешенные частоты радиоканалов, количество радиоканалов (абонентских линий связи), максимальное ослабление при распространении радиоволн, чувствительность абонентских терминалов, вид модели.

Далее, проводится частотное планирование план сети с указанием выбранных пунктов, размещения базовых станций, отвечающих требованиям по обеспечению необходимых линий связи.

При реальном проектировании сотовой сети связи, то есть при выборе и применении реального оборудования необходимы также выполнить требования по электропитанию, по возможности размещения оборудования, по установке антенн, по электромагнитной совместимости.

### III. Теория

Итак, сети поколения 4G (LTE и IEEE 802.16e) – это новый этап развития сетей третьего поколения. Сети четвертого поколения используют технологию IP-телефонии. Эта технология позволяет использовать пакетную передачу данных для голосовых вызовов. То есть в сетях 4G применены новые перспективные решения, которые найдут применение и в следующих поколениях мобильных сетей.

На рис. 1 приведена структурная схема организации LTE сети, которая иллюстрирует существенное изменение в сравнении с предыдущими сетевыми технологиями.

Основные изменения произошли и в подсистеме базовых станциях, и в подсистеме коммутаций. Технология обмена данными между пользовательским оборудованием и базовой станцией изменилась. Изменились и протоколы обмена данными между элементами сетевого взаимодействия. Основные функциональные части сети LTE: Serving SAE Gateway (SGW) – обслуживающий шлюз сети LTE; Public Data Network SAE Gateway (PGW) – шлюз сети LTE; Mobility Management Entity (MME) – узел управления мобильностью абонентов в сети LTE; Home Subscriber Server (HSS) – сервер абонентских данных сети LTE; Policy and Charging Rules Function (PCRF) – элемент сети LTE.

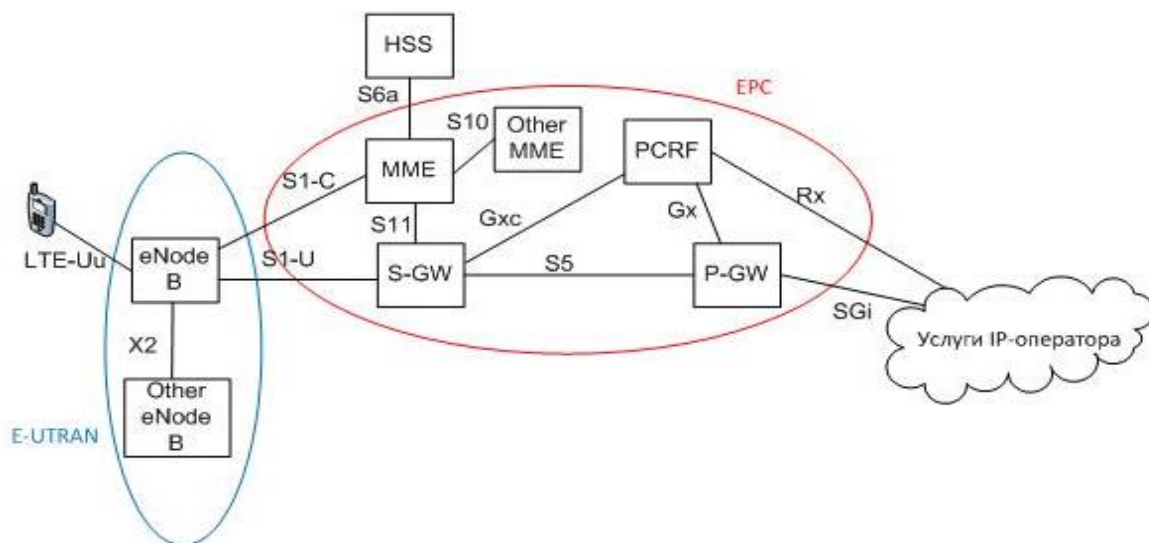


Рис. 1. Структурная схема сети стандарта LTE

В отличие от предыдущих поколений, а именно от третьего поколения, сети 4G не поддерживают традиционные услуги телефонии с коммутацией каналов. В 4G используется IP-телефония, то есть коммутация пакетов. Для осуществления услуг телефонии вызовы и сообщения «перенаправляются» через существующие сети 2G и 3G.

Радиодоступ LTE основан на OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) в нисходящей полосе связи и в заранее кодированном DFT OFDM в восходящей полосе связи. Применение технологии ортогонального частотного уплотнения увеличивает эффективность передачи информации. Максимальная скорость восходящей линии связи (UP - uplink) в технологии LTE составляет более 50 Мбит/с, а скорость нисходящей линии связи (DL - downlink) составляет более 100 Мбит/с при использовании канала 20 МГц.

При применении дополнительно технологии MIMO (Multiple Input/Multiple Output – множественный ввод/множественный вывод) могут быть еще существенно увеличены скорости передачи и приема информации.

Сети мобильной связи четвертого поколения в настоящее время используют более 40 разрешенных частотных диапазонов на частотах от сотен мегагерц до единиц гигагерц (каждому региону выделены определенные частотные диапазоны).

#### IV. Результаты моделирования

Проведено оперативное моделирование пропускной способности сети LTE в среде Matlab при различном количестве абонентов в населенном пункте (количество жителей 64 тысячи человек, площадь населенного пункта 47 км<sup>2</sup>).

Пакет примененного программного обеспечения имел функции и инструменты для проектирования, моделирования систем связи, соответствующих стандартам LTE. Этот программный пакет позволяет моделировать и анализировать различные линии связи.

Моделирование проводилось при изменении количества абонентов (при данном моделировании изменялось от 1 до 200 абонентов) и при изменении их территориального расположения. Параметры сети следующие:

- Частота – 2.14 ГГц.
- Полоса – 20 МГц (максимальная).
- Количество передающих и приемных антенн для технологии MIMO – 2 (4).
- Скорость передвижения абонентов – 5 км/ч.
- Городская среда (возможные потери сигнала – до минус 70 дБ).

Моделирование сети для технологии LTE показывает, что при изменении количества абонентов на базовую станцию средняя пропускная способность каждого абонента уменьшается, но средняя пропускная способность сотовой связи остается в пределах 60 Мбит/С. Радиус покрытия сотовой ячейки составлял 1 - 3 километра (это зависело от принятого при моделировании отношения сигнал/шум на входе абонентского терминала).

При моделировании получено, что применение технологии MIMO увеличило скорость передачи информации в нисходящем канале (MIMO2x2 – в 2 раза, MIMO4x4 - в 4 раза).

При моделировании учитывались основные требования модели Окумура–Хата при расчете потерь радиоволн на трассах. Но все же не учитывались различные условия реального распространения и отражения радиоволн в среде конкретного населенного пункта. Однако, такое моделирование было оперативное и позволило сформулировать общие выводы по частотному планированию и выбору расположения базовых станций. Результаты были подтверждены аналитическими вычислениями по модели Окумура–Хата.

## **V. Заключение**

В целом моделирование в среде Matlab (или в других подобных пакетах прикладных программ) показало возможность оперативного планирования мобильных сотовых сетей четвертого поколения. Общие недостатки подобных пакетов прикладных программ: малый объем программных библиотек, малые вычислительные мощности, а также существенная зависимость результатов от корректной постановки задачи исследования (от корректного учета различных реальных факторов).

Сетевое планирование с учетом различных реальных факторов выполняется в сотовых компаниях на специальных программных комплексах планирования радиосетей (iBwave Unity 9, Балтика СПС, ONEPLAN RPLS, Atoll).

## **Библиографический список**

1. Легков К.Е. Беспроводные сети нового поколения WiMax и LTE: анализ производительности при применении на транспорте // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 3. С. 46-51.

*Дата поступления статьи: 23.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 31.03.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Т.М. Баязитов, И. В. Никонов, 2023

УДК 621.376.32

*А. С. Бондаренко*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ FSK-МОДЕМА**

**Аннотация.** В данной работе исследуется частотная модуляция с минимальным разносом частот (MSK – minimum shift key) и ее применение в современных телекоммуникационных системах. Описываются различные виды частотной манипуляции, включая двоичную и

многопозиционную частотную манипуляцию, а также MSK и частотную манипуляцию с ограниченным спектром (GFSK – Gaussian Frequency-Shift Keying, GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying). Требования к проектированию FSK-модемов (FSK – Frequency-Shift Keying) также рассматриваются в работе. Была разработана схема модулятора FSK-модема, с планируемым улучшением в многопозиционный FSK.

**Ключевые слова:** Цифровая связь, частотная манипуляция, FSK-модем, GMSK, 4- FSK

## I. Введение

Цифровые модемы с частотной модуляцией широко используются в различных телекоммуникационных системах. Включая беспроводную связь, спутниковую связь и цифровое вещание. Производительность таких модемов зависит от их конструкции и внедрения, поэтому постоянно существует потребность в повышении их эффективности, надежности и универсальности.

Современный дизайн цифрового модема включает в себя комбинацию методов аналоговой и цифровой обработки сигналов, усовершенствованных схем модуляции и кодирования, алгоритмов оценки канала и выравнивания. Однако проектирование и анализ таких модемов по-прежнему являются сложными из-за компромиссов между различными параметрами.

В этом исследовании мы предлагаем модель цифрового модема с частотной модуляцией, целью которой является преодоление ограничений существующих конструкций. Модель будет разработана с использованием пакета прикладных программ «Matlab Simulink», который является инструментом моделирования для систем цифровой обработки сигналов и связи.

Практическая значимость данного исследования заключается в том, что предлагаемая модель может быть использована в качестве основы для проектирования и оптимизации цифровых модемов с частотной модуляцией в различных приложениях. Реализация Simulink позволяет интегрировать предлагаемую модель в существующие системы связи, что повышает их производительность и действенность.

## II. Частотная манипуляция

Формула, описывающая сигнал, полученный с помощью частотно-манипулированного ключевого сигнала (Frequency Shift Keying – FSK), представлена в общем аналитическом выражении [1]:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \varphi) \quad 0 \leq t \leq T; i = 1, \dots, M \quad (1)$$

где  $E$  – амплитуда сигнала,  $T$  – период сигнала,  $\omega_i$  – угловая частота сигнала,  $t$  – время сигнала,  $i$  – номер частоты,  $M$  – индекс модуляции.

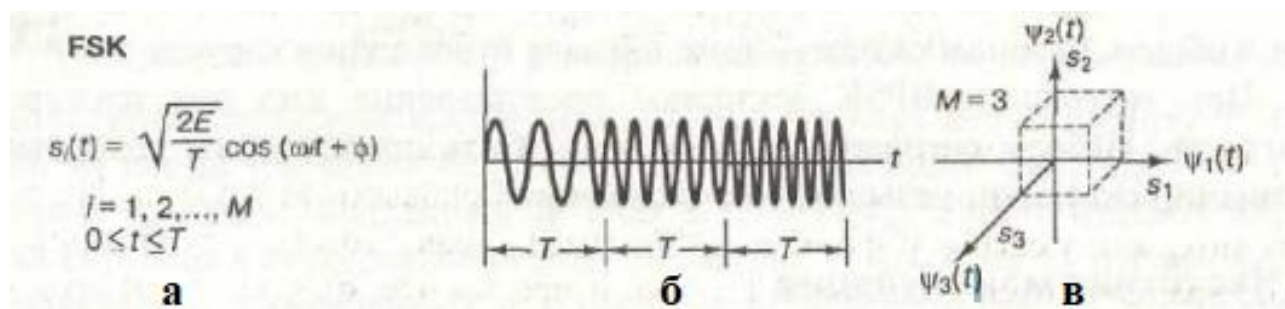


Рис. 1 Частотная манипуляция, где: а) аналитическое представление манипулированного сигнала; б) осциллограмма; в) векторное представление

Для частотно-манипулированного сигнала частота может принимать  $M$  дискретных значений, а фаза  $\varphi$  остается постоянной константой. Рис. 1 показывает схематическое изображение FSK-модулированного сигнала, демонстрирующее типичное изменение частоты в моменты переходов между символами [1, с. 201].

Частотная манипуляция бывает разных видов [2]:

- Двоичная частотная манипуляция.

Когда информационный сигнал имеет только два возможных значения, используется двоичная частотная манипуляция (FSK), т.е.  $M = 2$ .

- Многопозиционная частотная манипуляция.

Например, для сигнала 4-FSK набор значений символов исходного информационного сигнала  $\{00, 01, 10, 11\}$ .

- Частотная манипуляция с минимальным сдвигом.

Отличается тем, что индекс модуляции равен 0.5. Модуляция с индексом 0,5 обладает наивысшей спектральной эффективностью и известна как минимальная манипуляция сдвигом MSK (minimum shift key).

- Частотная манипуляция с ограниченным спектром (GFSK – Gaussian Frequency-Shift Keying, GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying).

MSK – это вид частотной модуляции, который позволяет уменьшить ширину полосы частот, занимаемых цифровым радиосигналом в эфире, но не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к современным радиосистемам мобильной связи. Обычно, чтобы сузить спектр сигнала MSK или FSK еще больше, используют фильтрацию модулирующего сигнала фильтром низкой частоты с Гауссовской импульсной характеристикой. Такой подход помогает достичь еще более узкого спектра радиочастот в эфире.

Анализ описанных выше видов частотной манипуляции позволяет выделить их общие однозначные преимущества над другими видами манипуляции:

- Огибающая амплитуды манипулированного сигнала остается постоянной, с незначительными изменениями при использовании фильтра основной полосы частот. Это позволяет использовать высокоэффективные режимы нелинейного усиления (В, С).
- Уровень излучения боковой полосы в спектре низок, что также приводит к небольшому количеству паразитной АМ (амплитудная модуляция), когда спектр ограничен.
- Возможна некогерентная демодуляция сигнала. Схема восстановления несущей частоты может быть опущена в приемнике, что приводит к значительному упрощению его структуры.

Рассмотренные виды частотной модуляции имеют различные применения в различных областях связи. Например, FSK используется в радиотелеметрии, системах дистанционного управления и системах подкачки. F-MSK (Multiple frequency-shift keying) используется в спутниковой и беспроводной связи. FSK и GMSK обычно используются в цифровых системах мобильной радиосвязи, таких как GSM (Global System for Mobile Communications) и Bluetooth (спецификации беспроводных сетей).

### III. Требования к схеме FSK-модема

Обычно при проектировании модемов отдают предпочтение амплитудной и фазовой модуляции, а также их подвидам: квадратурно-амплитудной модуляции (КАМ), многопозиционным фазовым модуляциям (четвертичная, восьмеричная и т. д.), квадратурно-внутриимпульсной фазовой модуляции (КВИФМ) и т. д. Кроме того, наличие в свободном доступе лишь скудной информации о FSK-модемах подтверждает тот факт, что проектирование FSK-модема на сегодняшний день является актуальной задачей.

К разрабатываемой мною схеме выдвигаются следующие требования:

- Модулятор в передатчике должен быть реализован на GMSK или 4-FSK.
- Также в передатчике будут спроектированы такие функциональные блоки, как формирователь пакетов и перенос на несущую частоту с фильтрацией.
- После передатчика в схеме будет реализован канал связи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Данный канал необходим для проверки помехоустойчивости проектируемой системы связи, а именно для тестирования блоков приемника: АРУ (автоматическая регулировка усиления), систем фазовой и частотной синхронизации. Планируется в канале с АБГШ осуществить тактовую и частотную рассинхронизацию.
- В приемном устройстве будут спроектированы следующие функциональные блоки: АРУ – для компенсации изменения амплитуды сигнала, схему ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты) для компенсации фазовой и частотной рассинхронизации, систему тактовой синхронизации для компенсации временной рассинхронизации по времени прихода отдельных символов.

#### IV. Разработка модулятора FSK-модема

На данный момент реализована только схема FSK-модулятора (рис. 2). В дальнейшем планируется улучшение ее в многопозиционную FSK, например, 4-FSK.

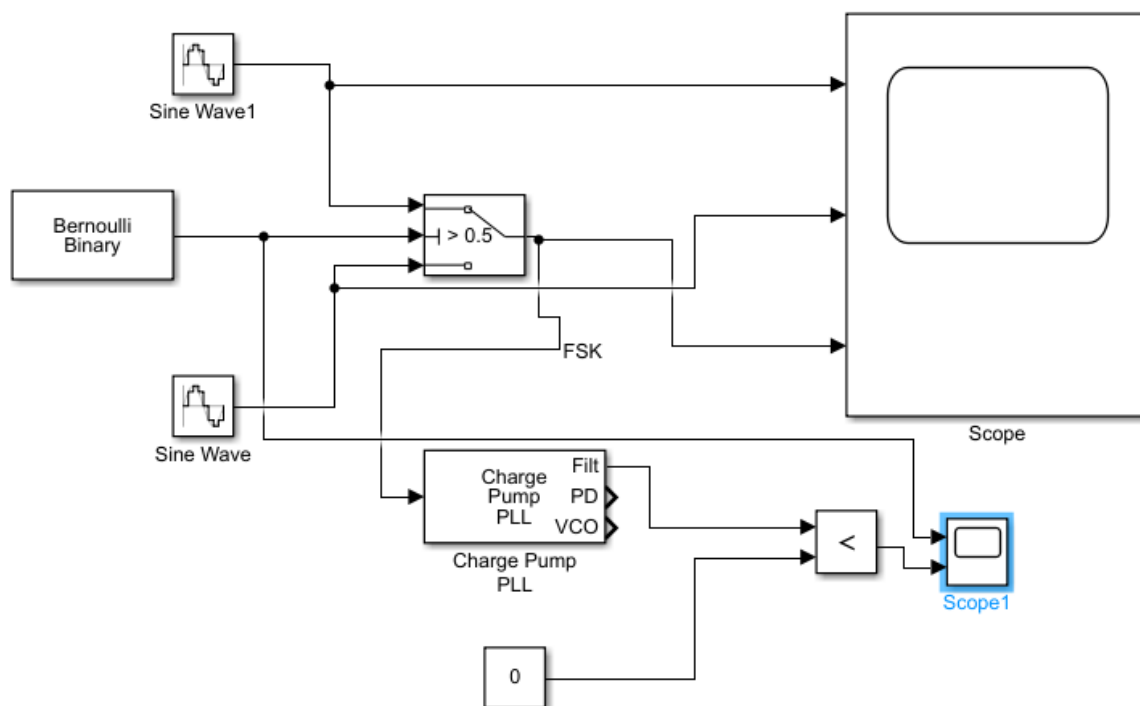


Рис. 2. FSK-модулятор, спроектированный в Simulink Matlab

Пример работы данной схемы представлен на рис. 3.

#### V. Заключение

Была рассмотрена частотная модуляция и ее разновидности, включая минимальную манипуляцию сдвигом (MSK), которая позволяет сузить ширину спектра радиочастот в эфире. Описаны требования к проектированию FSK-модемов, которые являются актуальной задачей в современных телекоммуникационных системах. Также представлена разработка модулятора FSK-модема с планируемым улучшением в многопозиционный FSK. Результаты данной работы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования FSK-модемов в цифровых телекоммуникационных системах.

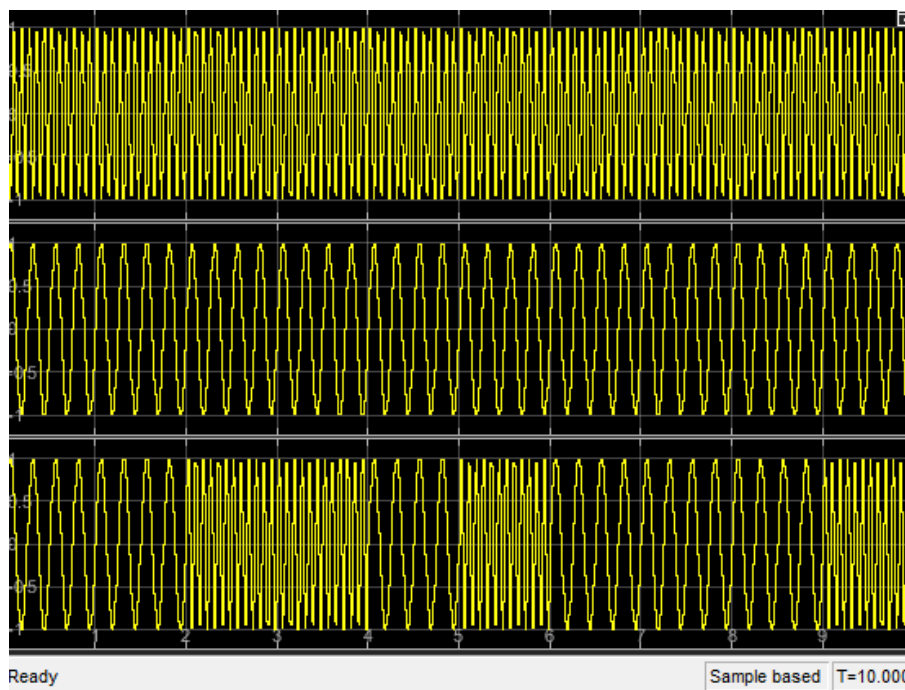


Рис. 3. Осциллограмма, демонстрирующая работу спроектированного модулятора

Научный руководитель: доц., к.т.н., Корнеев Дмитрий Алексеевич, Омский государственный технический университет.

#### Библиографический список

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Микушин А. В., Сединин В. И., Шингарев А. М. Анализ параметров частотной модуляции с минимальным сдвигом GMSK // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2008. № 1. С. 105-112.

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 03.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А.С. Бондаренко, 2023

УДК 621.396.94

*Е. А. Брониковский*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА СПУТНИКОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

**Аннотация.** Настоящая статья посвящена разработке программы расчета энергетического бюджета спутниковой линии связи на языке Python с использованием GUI-фреймворка



Tkinter. Программа позволяет пользователям вводить данные об абонентских терминалах и спутнике, а также выбирать между различными спутниками-ретрансляторами. В работе приведен обзор существующих программ для расчета энергетического бюджета, а также описаны преимущества и недостатки каждой из них. Разработанная программа имеет удобный графический интерфейс на русском языке, что делает простой в использовании. Результаты расчетов отображаются в таблицах, что обеспечивает наглядность полученных данных. В заключении работы приведены тезисы о перспективах улучшения разрабатываемой программы с целью повышения ее адекватности.

**Ключевые слова:** спутниковая связь, энергетический расчет радиолинии, программное обеспечение для расчета энергетического бюджета, радиолиния «земная станция – спутник-ретранслятор – земная станция».

## I. Введение

Развитие современных технологий в области связи требует постоянного улучшения качества и эффективности работы спутниковых линий связи. Одним из ключевых аспектов, влияющих на их работу, является энергетический бюджет, который позволяет определить требуемую мощность передатчика и энергопотребление системы в целом.

Разработка программы расчета энергетического бюджета спутниковых линий связи на языке Python является актуальной задачей, так как такая программа может помочь сократить время и упростить процесс расчета энергетического бюджета, а также повысить точность полученных результатов.

Python – это удобный и функциональный язык программирования, который имеет множество библиотек и инструментов для научных расчетов, что делает его отличным выбором для разработки упомянутой программы.

Такая программа будет полезна не только для производителей земных станций спутниковой связи и владельцев спутников, но и для разработчиков, которые могут использовать ее для определения требуемого оборудования и оптимизации проектирования спутниковой сети связи.

В данной статье будет рассмотрен процесс разработки программы расчета энергетического бюджета спутниковой линии связи на языке Python и ее возможности.

## II. Обзор существующих средств расчета энергетического бюджета

Сегодня автоматизация расчета энергетического бюджета спутниковых линий связи достигла высокого уровня. Для этой цели существуют различные программные комплексы, которые могут выполнять все необходимые действия. Существуют как универсальные программы, охватывающие широкий спектр задач, включая проектирование земных станций, так и специализированные программы, предназначенные для расчета определенных систем и сервисов, таких как Интернет, телевизионное вещание и другие.

Выбор системным проектировщиком программы для расчета энергетического бюджета является важной задачей. Важно, чтобы исходный продукт обеспечивал максимально точный расчет необходимых характеристик спутниковой системы связи. В то же время, он должен обладать простым и понятным интерфейсом, который не требовал бы от пользователя большой квалификации и длительных временных затрат на подготовку исходных данных для расчетов.

На сегодняшний день рынок программного обеспечения (ПО), позволяющего проводить расчеты энергетического бюджета, представлен компаниями, указанными в таблице 1.

**Сравнительная характеристика современных средств расчета энергетического бюджета**

Название калькулятора (производитель)	Достоинства	Недостатки
Link Budget Calculator (Satkoms UK)	Наличие двух версий калькулятора: простая и продвинутая (учитывает ряд дополнительных параметров)	1) Иностраный сайт; 2) Англоязычный интерфейс; 3) С 2023 года нет доступа к сайту.
Satellite Link Budget Calculator (Satellite Signals)	1) Свободный доступ 2) Учитывает ряд важных параметров, таких как отношение сигнала к помехам от других передающих устройств и к интермодуляционным помехам,	1) Иностраный сайт; 2) Англоязычный интерфейс 2) Учитывает малое количество исходных данных в отличие от своих аналогов.
Satellite Communication Link Budget Calculator (TutorialsWeb)	Свободный доступ	1) Иностраный сайт; 2) Англоязычный интерфейс
Satellite Link Budget Analyzer (программа интегрирована в MATLAB)	1) Интегрированность в MATLAB 2) Наличие графиков	1) Иностраный пакет прикладных программ; 2) Необходимо наличие лицензии MATLAB.
«Альбатрос-бюджет» (Информационный космический центр «Северная корона»)	Большое количества входных данных (учитываемых параметров)	1) Отсутствие программы в свободном доступе 2) Наличие большого количества параметров усложняет процесс разработки на начальном этапе
Программа для расчета энергетического бюджета радиолинии ((ФГУП «Космическая связь», автор А.Г. Ярославцев)	Большое количества входных данных (учитываемых параметров)	Отсутствие программы в свободном доступе

Link Budget Calculator, Satellite Link Budget Calculator и Satellite Communication Link Budget Calculator являются бесплатными калькуляторами и более простыми в использовании, но имеют англоязычный интерфейс и описание.

Однако, более продвинутые программы, такие как ФГУП (Федеральное государственное унитарное предприятие) «Космическая связь» и программный комплекс «Альбатрос-бюджет», позволяют получать наиболее полный набор данных по энергетическому бюджету радиолинии как в числовой, так и в графической форме. В данных программах заложены такие факторы, как учет скорости помехоустойчивого кодирования, тип модуляции, дополнительное кодирование Рида-Соломона и другие, что позволяет получать более точные результаты.

С другой стороны, эти более сложные программы требуют более высокой квалификации пользователей и могут затруднять получение конечного результата на

начальном этапе разработки системы спутниковой связи. Кроме того, для использования программных комплексов ФГУП «Космическая связь» и «Альбатрос-бюджет» необходимо иметь определенное разрешение или лицензию.

Еще одной программой, которая заслуживает упоминания, является Satellite Link Budget Analyzer, которая является частью пакета MATLAB. Эта программа имеет продвинутый набор функций и графический интерфейс, но также требует высокой квалификации пользователей. Для использования Satellite Link Budget Analyzer необходимо иметь лицензию MATLAB, что может повлиять на доступность данного решения для широкой аудитории.

Очевидно, что все вышеперечисленные программы имеют как значительные преимущества, так и существенные недостатки.

### III. Функционал разрабатываемой программы

Разрабатываемое ПО предназначено для расчета энергетического бюджета спутниковых линий связи и имеет интуитивно понятный графический интерфейс. Далее будет описан порядок работы с данной программой.

Терминал А		Спутник-ретранслятор		Терминал В	
Широта	55	Наклонная дальность до терминала А, км	39197.46153089088	Широта	55.76
Долгота	73	Наклонная дальность до терминала В, км	39008.01113349785	Долгота	37.61
Высота антенны над уровнем моря	85	Плотность потока мощности		Высота антенны над уровнем моря	143
Угол места	0.41249791324902196			Угол места	0.44745389007004616
Частота передачи, ГГц	28			Частота приема, ГГц	27
Диаметр антенны, м	1			Диаметр антенны, м	1
Эффективность антенны	0.65			Эффективность антенны	0.65
Мощность передатчика, Вт	10			КУ антенны, дБ	-31.018730204309964
КПД передающего тракта	0.65			Коэффициент шумовой добротности G/T	
Ширина полосы пропускания, кГц	20			Потери на 2 участке, дБ	
КУ антенны, дБ	-31.3346155479746			Отношение сигнал/шум	
ЭИИМ, дБ	-20.6846155479746				
Потери на 1 участке, дБ	-181.78827448837214				
Отношение сигнал/шум	-181.78827448837214				

Выберите спутник:

- Ямал-601
- Экспресс-АМУ1
- Экспресс-АМ5

Рассчитать

Рис. 1. Рабочее окно программы «Расчет энергетического бюджета спутниковой линии»

Пользователь может ввести данные об абонентских терминалах А и В, а также о спутнике. Для терминалов необходимо указать широту, долготу, высоту антенны терминала над уровнем моря, частоту передачи в ГГц, диаметр антенны в метрах, эффективность антенны, мощность передатчика в Вт и ширину полосы сигнала в кГц, КПД передающего тракта. Для спутника ничего вводить не надо, поскольку программа хранит данные о трех спутниках «Ямал-601», «Экспресс-АМУ1» и «Экспресс-АМ5». Данные спутники-ретрансляторы (СР) выбраны по причине того, что они являются практически самыми современными геостационарными спутниками Российской Федерации, не считая недавно вышедшие (в 2022 году) на рабочие позиции спутники: «Экспресс-АМУ3» и «Экспресс-АМУ7». О данных спутниках мало технической информации в открытом доступе.

После ввода данных программа производит расчет энергетического бюджета, после чего отображает рассчитанные данные на экране в виде таблиц, ячейки которых подсвечены синим цветом.

Преимуществом программы является ее простой и удобный графический интерфейс на русском языке.

Часть основных формул, на основе которых построена программа, представлена ниже [1]:

Угол места «точки размещения спутникового ретранслятора относительно точки размещения абонентского терминала» определяется по формуле:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\cos \psi - \gamma_0}{\sqrt{1 - \cos^2 \psi}}\right), \text{град} \quad (1)$$

где коэффициент  $\gamma_0 = \frac{R_3}{R_3 + H_{\text{гео}}}$ ,  $R_3 = 6378$  км – радиус Земли;  $H_{\text{гео}} = 35786$  км – высота геостационарной орбиты;

Вспомогательный параметр  $\cos \psi$ , рассчитываемый с помощью выражения:

$$\cos \psi = \cos \sigma_{\text{аб}} \cos(\theta_{\text{аб}} - \theta_{\text{ср}}) \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{аб}}$  – широта точки размещения абонентского терминала, в град;  $\theta_{\text{аб}}$  – долгота точки размещения абонентского терминала, в град;  $\theta_{\text{ср}}$  – долгота точки размещения абонентского терминала, в град.

Важным параметром, который рассчитывает данная программа, является параметр «Потери на 1 участке», т.е. потери на линии «земная станция – спутник-ретранслятор». Их определяют с помощью формулы:

$$L = L_0 + L_{\text{доп}}, \text{дБ} \quad (3)$$

где  $L_0$ , дБ – потери при распространении сигнала в свободном пространстве;  $L_{\text{доп}}$ , дБ – дополнительные потери, обусловленные различными факторами, такими как поглощением в газах, входящих в состав тропосферы – кислороде и водяных парах; поглощением и рассеиванием части энергии сигнала в гидрометеорах; неточностью наведения антенны; несогласованностью поляризаций антенн.

Стоит отметить, что в рамках данной работы представлена только часть формул, на основе которых проводит расчеты программы.

#### **IV. Планируемое расширение функционала программы для учета дополнительных факторов при расчете энергетического бюджета**

В настоящий момент программа находится на этапе разработки и планируется добавить гораздо большее количество спутников в базу данных программы, включая как отечественные, так и зарубежные спутники. Это позволит пользователям предоставить большой выбор СР для своей линии связи.

Кроме того, планируется добавление в базу данных информации о типовых абонентских терминалах, которые используются для связи со спутниками, уже внесенными в базу.

Одним из главных нововведений, которые планируются в будущей версии программы, является возможность выбора точек местоположения абонентских терминалов на «Google Карты» или «Яндекс.Карты». После выбора местоположения на карте будут автоматически считаны данные, такие как широта, долгота и высота над уровнем моря. Однако для реализации этой функции потребуется внедрение API вышеперечисленных программ.

Также, в дальнейшем планируется расширение функционала программы с учетом дополнительных важных параметров, таких как отношение сигнала к помехам от других передающих устройств и к интермодуляционным помехам. Эти параметры являются существенными для обеспечения стабильной и качественной связи между абонентским терминалом и спутником-ретранслятором. Расчет этих параметров позволит более адекватно оценивать параметры спутниковой линии связи.

## **V. Заключение**

Рассматриваемая программа для расчета энергетического бюджета спутниковой линии связи может значительно упростить и ускорить процесс проектирования и планирования спутниковой связи, что позволит экономить время и средства.

На основе изученных преимуществ и недостатков рассмотренных средств расчета были выделены основные функциональные требования к разрабатываемой программе, такие как удобный интерфейс, возможность ввода данных об абонентских терминалах и спутниках, а также автоматический расчет энергетического бюджета.

В результате была разработана программа на Python, которая позволяет производить расчет энергетического бюджета спутниковой линии связи, исходя из введенных пользователем данных. Она имеет графический интерфейс на основе Tkinter и обладает удобным и интуитивно понятным интерфейсом.

## **Научное руководство**

Научный руководитель: доц., к.т.н., Лутченко Сергей Святославович, Омский государственный технический университет.

## **Библиографический список**

1. Ерохин Г. А., Мандель В. И., Нестёркин Ю. А. [и др.]. Методика расчета энергетического запаса радиолинии «космический аппарат – станция» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, № 1. С. 65–74.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 03.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. А. Брониковский, 2023

УДК 621.592.0

*Д. В. Галуза*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РАДИОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**Аннотация.** Данная работа посвящена применению алгоритмов машинного для разработки модели оценки комплексного показателя надежности радиостанции, коэффициента технического использования. Моделирование проводилось с использованием языка программирования Python и инструментов библиотеки scikit-learn.

**Ключевые слова:** машинное обучение, алгоритмы машинного обучения, модели машинного обучения, надежность.

## **I. Введение**

Надежность радиоэлектронного оборудования является критически важным фактором для обеспечения безопасности, эффективности и безотказности процессов и систем, которые они поддерживают. Оценка показателей надежности используется для определения

возможных рисков, вероятности отказа оборудования и может быть очень сложной задачей, особенно если учитывать большое количество параметров, влияющих на производительность, а также состояние и настройки оборудования.

С целью повышения надежности проводится ряд мероприятий, таких как: плановое техническое обслуживание, техническое диагностирование и т.п. Как итог математические модели, описывающие реальные процессы, становятся очень сложными.

Уравнения, формулы и алгоритмы, описывающие поведение системы или реальных процессов, используются в создании имитационных моделей, которые в свою очередь применяются в имитационном моделировании. Для создания имитационной модели нужно использовать какое-либо программное обеспечение, чтобы смоделировать поведение этой системы или процесса в виртуальной среде. Сам процесс моделирования требует большой вычислительный ресурс, который есть не у каждого, однако данную проблему можно решить, применяя машинное обучение. Его весомым достоинством является разработка более быстродействующих моделей.

Сегодня машинное обучение используется в сочетании с имитационным моделированием с целью повышения точности и эффективности моделирования. Имитационная модель так же может выступать не только в роли генератора данных, но и полноценной средой для обучения в ней искусственного интеллекта [1].

Алгоритмы машинного обучения используются для анализа больших объемов данных, выявления закономерностей и создания моделей на основе этих закономерностей. При создании моделей используются различные алгоритмы, такие как метод опорных векторов, случайный лес, нейронные сети и другие. Это помогает имитационным моделям стать более точными с течением времени за счет уточнения входных параметров и выявления корреляций между различными переменными.

Машинное обучение также можно использовать для ускорения моделирования путем определения наиболее важных факторов, уменьшения количества необходимых моделей, которые обучаются на лету, в отличие от предварительно написанных моделей.

Более подробно о совместном применении имитационного моделирования и методов машинного обучения можно найти в статье [2].

## II. Постановка задачи

Основной задачей данной работы является: разработка моделей с использованием библиотеки scikit-learn на языке Python, вычисляющей значения коэффициента технического использования в зависимости от входных параметров, и последующий выбор наилучшей модели с учётом следующих критериев качества:

- Метрик качества (коэффициента детерминации  $R^2$ , среднеквадратичной ошибки MSE и средней абсолютной ошибки MAE).
- Времени затраченного на формирование вектора оценок  $K_{ТИ}$ .

Модели будут создаваться на основании данных, описанных в статье [3]. Входными параметрами являются: интенсивность отказов  $L_{02}$ ; интенсивность разрегулировок  $L_{01}$ ; интенсивность отказов разрегулированной системы  $L_{12}$ ; время проверки оборудования  $T_p$ ; время восстановительного ремонта  $T_s$ ; время для настройки оборудования  $T_f$ ; время поиск неисправности  $T_a$ ;  $a_1$  и  $b_1$  – вероятность ошибки 1го (a) и 2го (b) рода встроенных средств диагностики;  $a_2$  и  $b_2$  – вероятность ошибки 1го (a) и 2го (b) рода внешних средств диагностики; вероятность ошибки обслуживающего персонала  $E_{op}$ .

## III. Теория

Машинное обучение – это раздел искусственного интеллекта, посвященная изучению алгоритмов, автоматически улучшающихся благодаря опыту. Алгоритмы используют статистические модели и итерационные процессы для повышения производительности с

течением времени, что делает их полезными для многих задач, таких как распознавание изображений, обработка естественного языка и прогнозная аналитика. Данные могут быть получены из естественной среды, созданы вручную или сгенерированы другим алгоритмом.

Основными задачами машинного обучения являются:

- Регрессия.
- Кластеризация.
- Классификация.

В данной работе решалась задачи регрессии. Регрессия в машинном обучении – это тип контролируемого обучения, при котором модель обучается прогнозировать непрерывный числовой вывод на основе заданного набора входных признаков. Она используется для прогнозирования значения непрерывной переменной на основе значений других переменных.

В ходе работы использовались различные алгоритмы регрессии, такие как: Gradient Boosting Regressor; Hist Gradient Boosting Regressor; LGBM Regressor; Random Forest Regressor; Linear Regression.

Линейная регрессия (Linear Regression) – это метод статистического машинного обучения, который используется для анализа взаимосвязи между двумя непрерывными переменными. Это алгоритм, который используется для моделирования линейной зависимости между зависимой переменной (целевой переменной) и независимой переменной (переменной-предиктором). В модели линейной регрессии зависимая переменная может быть предсказана с использованием линейной комбинации одной или нескольких независимых переменных. Связь между зависимой переменной и независимой переменной может быть представлена прямой линией, называемой линией регрессии или линией наилучшего соответствия [4].

Случайный лес (Random Forest Regressor) – ансамбль решающих деревьев. В данном методе строится очень много решающих деревьев большой глубины на разных обучающих данных. Деревья строятся до тех пор, пока в каждом листе не окажется очень мало объектов, то есть они сильно переобучены. Затем все деревья объединяются, и мы получаем эффективный классификатор, у которого отсутствуют недостатки решающих деревьев. Но это вызывает некоторые проблемы, если признаков очень много, то этот подход работает не очень хорошо: деревья будут очень глубокими, на их построение будет уходить слишком много времени [4].

Бустинг (boosting) означает дословно «усиление» «слабых» моделей – это процедура последовательного построения композиции алгоритмов машинного обучения, когда каждый следующий алгоритм стремится компенсировать недостатки композиции всех предыдущих алгоритмов [5].

Gradient Boosting Regressor, Hist Gradient Boosting Regressor, LGBM Regressor относятся к алгоритмам бустинга.

Также для более качественной работы модели необходимо осуществлять подбор гиперпараметров. Гиперпараметры – это определяемые пользователем параметры, влияющие на поведение алгоритмов машинного обучения.

#### IV. Ход работы

Исходными данными в работе являлся набор данных, который содержит результаты экспериментов с имитационной моделью 8 состояний, описывающей процесс эксплуатации и технического обслуживания средств радиосвязи [6]. Эксперимент проводился с целью случайного перебора входных параметров модели и вычислению среднего значения коэффициента готовности  $K_r$  и коэффициента технического использования  $K_{ти}$  в зависимости от периодичности обслуживания в интервале от 1 до 36 месяцев.

В экспериментах применялся множественный выход и т.к. не все алгоритмы его поддерживают то был использован Multi Output Regression. Это тип алгоритма машинного обучения, который используется для прогнозирования нескольких выходов из одного входа.

Перед проведением экспериментов весь набор данных был разбит на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30. Общее количество признаков 12 по кол-ву входных параметров имитационной модели.

Размерности общего набора данных, а также тестовой и обучающей частей выходных параметров представлены в таблице ниже.

Таблица 1

**Размерности данных**

Набор данных	Размерность (строки, столбцы)
Общий набор данных	1191,86
Тестовая часть выходных признаков для расчета $K_{ТИ}$	833,36
Обучающая часть выходных признаков для расчета $K_{ТИ}$	358,36

На языке Python и с использованием методов библиотеки scikit-learn был разработан скрипт обучения и тестирования моделей с оценками метрик качества MSE, MAE, R2. Также для улучшения был произведен подбор гиперпараметров с использованием алгоритма Randomized Search CV.

Таблица 2

**Метрики качества модели при использовании алгоритма Linear Regression**

Метрика качества	Значение при предсказании $K_{ТИ}$
$MSE$	0,000018
$MAE$	0,002717
$R^2$	0,840732

Время, затраченное на формирование вектора оценок  $K_{ТИ}$  1,015 с.

Таблица 3

**Метрики качества модели при использовании алгоритма Random Forest Regressor**

Метрика качества	Значение при предсказании $K_{ТИ}$
$MSE$	0,000002
$MAE$	0,000860
$R^2$	0,876349

Время, затраченное на формирование вектора оценок  $K_{ТИ}$  70,007 с.

Таблица 4

**Метрики качества модели при использовании алгоритма Gradient Boosting Regressor**

Метрика качества	Значение при предсказании $K_{ТИ}$
$MSE$	0,000002
$MAE$	0,000791
$R^2$	0,890822



Время, затраченное на формирование вектора оценок  $K_{ТИ}$  39,471 с.

Таблица 5

**Метрики качества модели при использовании алгоритма LGBM Regressor**

Метрика качества	Значение при предсказании $K_{ТИ}$ .
<i>MSE</i>	0,000002
<i>MAE</i>	0,000793
$R^2$	0,859284

Время, затраченное на формирование вектора оценок  $K_{ТИ}$  12,08 с.

Таблица 6

**Метрики качества модели при использовании алгоритма Hist Gradient Boosting Regressor**

Метрика качества	Значение при предсказании $K_{ТИ}$ .
<i>MSE</i>	0,000001
<i>MAE</i>	0,000755
$R^2$	0,910175

Время, затраченное на формирование вектора оценок  $K_{ТИ}$  52,988 с.

На основании метрик качества была выбрана наилучшая модель, предназначенная для решения задачи, поставленной в пункте II. На данный момент времени ею является модель с использованием алгоритма Hist Gradient Boosting Regressor.

## V. Заключение

В ходе выполнения данной работы, были изучены различные алгоритмы машинного обучения, разработан скрипт для обучения моделей с целью вычисления коэффициента технического использования на основе данных имитационного моделирования. Наилучшей из всех оказалась модель на основе алгоритма Hist Gradient Boosting Regressor.

В дальнейшем планируется использование большего количества алгоритмов для более точного определения подходящей модели, а также разработка модели для вычисления коэффициента готовности.

Научный руководитель: к.т.н., Любченко Александр Александрович, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Logstrategy совместное применение машинного обучения и имитационного моделирования. URL: <https://logstrategy.ru/ai> (дата обращения: 25.03.2023).
2. Казаков О. Д., Азаренко Н. Ю. Комбинирование методов машинного обучения и имитационного моделирования социально-экономических процессов в системах поддержки принятия решений // Вестник РГРТУ. 2020. № 71. С. 97–107.
3. Любченко А. А., Пачеко Б. Х., Копытов Е. Ю. Формирование набора данных для разработки моделей машинного обучения в задачах анализа надежности средств железнодорожной электросвязи // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорт: докл. 3-й Всерос. научно-тех. конф. с международным участием. 18 – 19 октября 2018 г. Омск, 2018. С. 353–360.

4. Самигулин Т.Р. Анализ тональности текста методами машинного обучения // Научный результат. Информационные технологии. 2021. № 1. С. 55–63. ISSN 2518-1092. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/314475> (дата обращения: 25.03.2023).

5. Карасев П. И, Минина Е. Н., Стародубов К. В. Применение нейронных сетей для распознавания образов в автоматизированных системах управления // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Управление строительством. 2015. № 2(7). С. 190–195. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/296624> (дата обращения: 25.03.2023).

6. Lyubchenko A. A. et al. Any Logic-Based Analysis of Maintenance Efficiency of Aging Railway Telecommunication Equipment // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE. 2018. P. 168–173.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 07.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. В. Галуза, 2023

УДК 621.396

*А. В. Гетман, А. Р. Закирова*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **VOLTE: ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ВНЕДРЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОЛОСОВЫХ ВЫЗОВОВ**

**Аннотация.** В настоящий момент значительную роль играет скорость передачи и получения информации, а уровень проникновения абонентских мобильных устройств с поддержкой сетей 5G (5 Generation) хоть и растет, но не достиг необходимого порога для начала разворачивания сетей 5G мобильными операторами страны. На данном этапе это нецелесообразно и требует больших затрат, поэтому операторы используют технологии, позволяющие улучшать сети уже интегрированных поколений. В статье рассматриваются преимущества и недостатки одной из таких технологий — VoLTE (Voice over Long-Term Evolution), а также требования для запуска на сети.

**Ключевые слова:** VoLTE (Voice over Long-Term Evolution), звонки в LTE (Long-Term Evolution), IMS (IP Multimedia Subsystem), CSFB (Circuit-Switched FallBack).

### **I. Введение**

Несмотря на то что трафик пакетной передачи данных сильно превышает голосовой, звонки остаются важной частью систем мобильной связи. VoLTE (Voice over LTE) – технология, позволяющая совершать голосовые вызовы по сетям LTE (Long-Term Evolution) без использования CSFB (Circuit-Switched FallBack) [1]. 4G (LTE) изначально было «довесом» к уже существующим поколениям, поэтому операторы сотовой связи применяли LTE только для широкополосного доступа в интернет, тогда как голосовые вызовы продолжали обеспечиваться за счет 2G (2 Generation) и 3G (3 Generation). Для этого использовалась технология CSFB, которая автоматически переводит мобильное устройство абонента в стандарт предыдущего поколения при входящих и исходящих вызовах. Данная

технология требует времени для соединения, так как при нажатии на «вызов» выполняется запрос на предоставление сервиса, подразумевающий обмен сигнальными сообщениями между мобильным устройством, eNodeB (evolved NodeB), MME (Mobility Management Entity), SGSN (Serving GPRS Support Node), RNC (Radio Network Controller) или BSC (Base Station Controller). В 2G и 3G вызовы организованы за счет установления канальных соединений с постоянной емкостью, которые занимают на протяжении всего разговора.

По данным отчета компании Ericsson о мобильной связи за 2022 год более половины всех абонентов по всему миру уже используют VoLTE и по прогнозам в ближайшее время их число превысит 4,6 миллиардов. Мобильные операторы постепенно отказываются от сетей 2G и 3G, освобождая ресурсы для расширения покрытия 4G, что приближает к полноценному запуску 5G [2].

## II. Теория

Важно использовать комплексный подход к внедрению технологии, чтобы обеспечить сохранение классических преимуществ телекоммуникаций, таких как превосходное качество голоса с QoS (Quality of Service), управление мобильностью, повторное использование международного абонентского номера мобильного абонента (MSISDN – Mobile Subscriber Integrated Services Digital Number) для глобальных сетей, интерконнект, международный роуминг и различные виды регулирующих и дополнительных услуг.

Сеть радиодоступа eUTRAN (evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) не имеет собственного ядра канальной коммутации CS Core (Circuit Switched Core), вызовы организуются за счет обмена сигнальными сообщениями между PS (Packet Switched) и CS Core по интерфейсу SGs. У сетей 2G (GERAN – GSM EDGE Radio Access Network) и 3G (UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network) есть аналогичный интерфейс – Gs, который при вызове позволял останавливать пакетную передачу данных для установления канального соединения. Отличие лишь в том, что не требуется переход между сетями различных поколений.

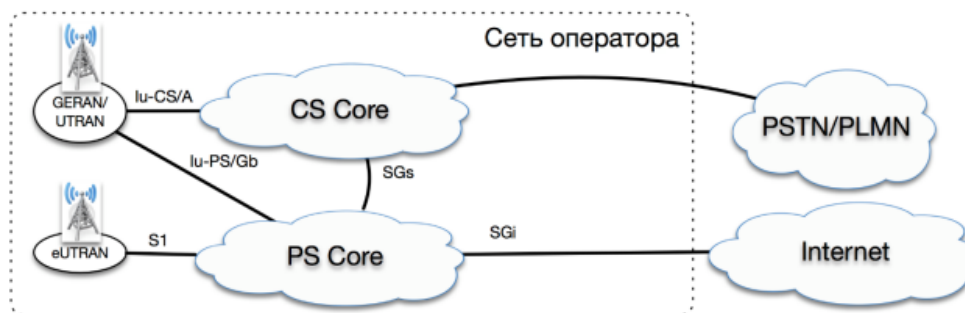


Рис. 1. Схема коммутации сетей 2G, 3G и 4G

Для работы VoLTE и прямого перевода голосовых вызовов с канальной на пакетную коммутацию необходима интеграция подсистемы IMS (IP Multimedia Subsystem), с которой PS Core будет связана напрямую через интерфейс S-Gi. Сложность интеграции подсистемы IMS в существующую сеть заключается в том, что она состоит из множества сетевых элементов, выполняющих различные функции, таких как P-CSCF (Proxy Call Session Control Function), S-CSCF (Serving CSCF) и I-CSCF (Interrogating CSCF), которые взаимодействуют для установления мультимедийных сеансов и управления ими. P-CSCF действует как посредник между абонентским устройством и сетевыми элементами, в то время как S-CSCF является основной функцией управления вызовами, а I-CSCF отвечает за маршрутизацию запросов на сеанс. Вместе эти элементы образуют универсальную и адаптируемую платформу для предоставления мультимедийных услуг по сетям LTE [1].

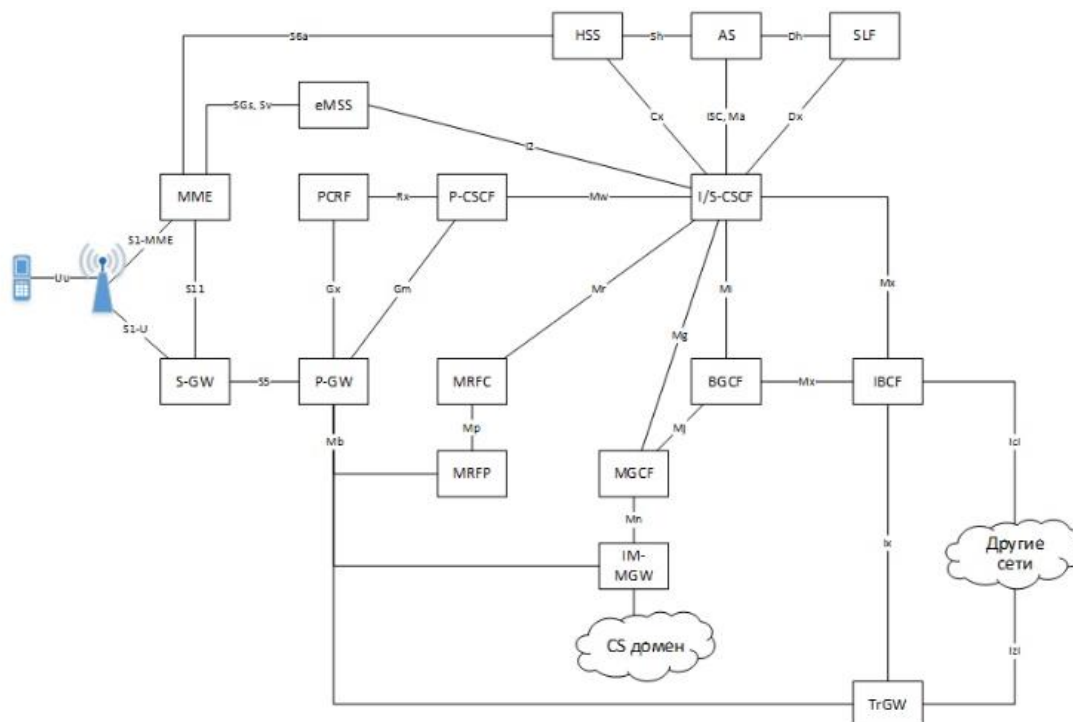


Рис. 2. Архитектура подсети IMS

Немаловажным требованием является и программное обеспечение на всей сети оператора, поэтому базовые станции в том числе должны поддерживать функцию VoLTE. Базовые станции Ericsson поддерживают Voice over LTE начиная с версии ПО (Программное обеспечение) 14A, Nokia – Flexi Multiradio System (MRS) с 13.0, а Huawei с U1900G1D019. Данные версии ПО были разработаны и введены вендорами с 2012 года, поэтому все базовые станции LTE Ericsson, Nokia и Huawei с актуальной версией софта будут поддерживать VoLTE.

Также не исключена необходимость в расширении емкости уже построенной сети LTE, так как после запуска технологии трафик и нагрузка увеличатся. Трафик данных VoLTE имеет неравномерную интенсивность сообщений с коэффициентом пульсации, рассчитываемым как отношение средней интенсивности к максимально возможной. Передают данные только активные абоненты, количество которых варьируется. Требуемая пропускная способность базовой станции для работы VoLTE зависит от таких факторов, как количество активных пользователей, используемый кодек и объем трафика данных. Как правило, для одного вызова VoLTE базовой станции требуется около 12–24 кбит/с полосы пропускания. Таким образом, базовая станция с полосой пропускания 10 МГц может поддерживать около 80–160 одновременных вызовов VoLTE.

Основные преимущества внедрения VoLTE:

- Соединение при голосовом вызове устанавливается быстрее за счет отсутствия необходимости переключения и обмена сигнальными сообщениями между сетями различных поколений.
- Возможность пользоваться высокоскоростным интернетом во время разговора, передача данных во время звонка не блокируется в пользу голосового вызова.
- Отсутствие ограничения полосы передачи, сохранение высокого качества передачи голоса (HD – High Density).
- Полноценный переход на LTE, эффективное использование сетевых ресурсов.

- Сокращение расходов, связанных с поддержкой отдельных сетей предыдущих поколений для передачи голоса и данных.
  - Интегрированная подсистема IMS предоставляет возможность реализации дополнительных мультимедийных услуг для абонентов.
  - Возможность адаптировать гибкую технологию IMS к изменяющимся телекоммуникационным технологиям, использовать в архитектуре сетей 5G [3].
  - VoLTE предлагает улучшенное покрытие внутри помещений по сравнению с обычными голосовыми вызовами благодаря использованию технологии 4G LTE.
  - VoLTE обеспечивает беспрепятственный роуминг для передачи голоса и данных, преимущество для тех, кто часто путешествует.
  - Возможность разговаривать с несколькими абонентами одновременно.
- Явные недостатки внедрения технологии:
- Дополнительные затраты на модернизацию инфраструктуры, интеграцию подсистемы IMS, расширение емкости и количества базовых станций LTE.
  - Мобильные устройства пользователей должны поддерживать VoLTE (не все устройства, поддерживающие LTE, могут поддерживать VoLTE).
  - Нагрузка на аккумулятор мобильного устройства.
  - Максимальный эффект улучшения качества звука достигается при включении VoLTE на устройствах всех абонентов в конференции/звонке.

### III. Заключение

Технология VoLTE стала революционной технологией, позволяющей телекоммуникационной отрасли предоставлять своим клиентам высококачественные услуги голосовых вызовов. Ее внедрение в мобильных сетях дает множество преимуществ для пользователей, операторов связи и разработчиков инфраструктуры. Быстрые соединения, возможность использования интернета во время звонка, сохранение высокого качества связи и беспрепятственный роуминг – это лишь малая часть из множества достоинств данной технологии. Однако следует учитывать и некоторые недостатки, такие как затраты на модернизацию сети и ограниченная совместимость устройств.

Вклад во внедрение подсистемы IMS имеет стратегическое значение для мобильных операторов. Это весомый вклад в дальнейшее развитие телекоммуникационных услуг, который приблизит к запуску сетей нового поколения, а также снизит дальнейшие расходы за счет упрощения и оптимизации инфраструктуры и ее управления. Проблема с поддержкой VoLTE абонентскими устройствами постепенно сходит на нет: уже на начало 2021 года число смартфонов с поддержкой технологии в России составляло около 50%, новые устройства выпускаются с поддержкой VoLTE, поэтому число пользователей будет только расти. Можно сделать вывод, что недостатки внедрения технологии VoLTE являются временными и устранимыми.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Лутченко Сергей Святославович, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. VoLTE Deployment Evolution – CS only to Voice over IP in LTE Network // 3GLTEinfo URL: <https://www.3glteinfo.com/volte-deployment-evolution-cs-voice-ip-lte-network/> (дата обращения: 21.03.2023).
2. Ericsson Mobility Report // Ericsson. June 2022. URL: <https://www.ericsson.com/49d3a0/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2022/ericsson-mobility-report-june-2022.pdf> (дата обращения: 21.03.2023).
3. Joyce A. A., Adebisi A. A., Okeyinka A. E. [et al.]. An Overview of 5G Technology //

*Дата поступления статьи: 24.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. В. Гетман, А. Р. Закирова, 2023

УДК 621.3.087.9

*М. В. Ермаков, А. П. Аверченко*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **АНАЛИЗ УСТРОЙСТВА ПЛАТЫ DATA CONVERSION HSMC ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА ПЛИС ДЛЯ ПРИЕМА АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА**

**Аннотация.** Данная статья будет посвящена ходу выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) на тему «Проектирование IP-модуля приема аналогового сигнала с помощью ПЛИС». Будут рассмотрены устройства, применяемые для реализации данной ВКР, а также будет дано техническое описание применяемых устройств. Также будет описан процесс реализации проекта ПЛИС.

**Ключевые слова:** программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), плата АЦП-ЦАП Data Conversion HSMC, отладочная плата ПЛИС DE2-115.

### **I. Введение**

На сегодняшний день практически все радиоприемные устройства содержат в себе устройства по обработке и хранению информации в цифровом виде. Одними из таких устройств являются аналогово-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

АЦП служат для преобразования входного тока или напряжения в двоичный цифровой код. Существуют различные типы АЦП: последовательного приближения, параллельные, конвейерные и т.д.

ЦАП служат для преобразования информации из цифровой формы в аналоговый сигнал. Затем аналоговый сигнал поступает на устройства вывода. Это могут быть вольтметры, амперметры, динамики, осциллограф и т.п.

На данный момент в вычислительной технике широко применяются ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема). Сигнал, обработанный с помощью АЦП, возможно подать на ПЛИС для дальнейшей его обработки. Однако, современные АЦП и ЦАП устроены таким образом, что их настройка может осуществляться непосредственно с помощью ПЛИС, что дает широкий спектр возможностей.

Настройку и оценку работы АЦП и ЦАП через ПЛИС возможно произвести через отладочные платы АЦП-ЦАП. Ярким примером среди них является плата АЦП-ЦАП Data Conversion HSMC от компании «Altera». В этой статье будут описаны принципы ее работы.

Разработка проекта ПЛИС и оценка ее работы возможно осуществить с помощью отладочной платы DE2-115 от той же компании-производителя.

В этой статье будет рассмотрена возможность настройки платы АЦП-ЦАП с помощью ПЛИС Cyclone IV E.

## II. Постановка задачи

Задача состоит в том, что необходимо настроить совместную работу платы АЦП-ЦАП Data Conversion HSMC и ПЛИС Cyclone IV E.

Плата АЦП-ЦАП представляет собой совмещенные между собой АЦП AD9254 от компании «Analog Devices» [1] и ЦАП DAC5672 от компании «Texas Instruments» [2]. Характеристики данных устройств представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

**Характеристики АЦП AD9254**

Характеристика	Значение
Разрядность	14 бит
Число каналов	1
Частота дискретизации	70 МГц
Разрешение	$6,104 * 10^{-5}$
Интерфейс	SPI
Тип	Параллельный
Отношение сигнал/шум	71,8 дБ
Частота дискретизации	150 млн. выборок/с
Дифференциальная нелинейность	$\pm 0,4$ LSB
Напряжение аналоговое	1,8 В
Выходное напряжение	от 1,8 В до 3,3 В

Таблица 2

**Характеристики ЦАП DAC5672**

Характеристика	Значение
Разрешение	14 бит
Число каналов	2
Отношение сигнал/шум	70 дБ
Частота семплирования	200 млн. выборок/с
Диапазон напряжения питания	для цифровых входов: от -0,5 В до 4 В для аналоговых выходов: от -0,5 В до 4 В

В данной работе нас больше интересуют характеристики АЦП, под него и будет в дальнейшем разработан проект ПЛИС. ЦАП в этой работе, скорее, является вспомогательным устройством, с помощью которого можно проверить работу АЦП.

Внешний вид платы АЦП-ЦАП представлен на рис. 1. Помимо АЦП и ЦАП она также содержит в себе и другие устройства, с помощью которых можно настраивать работу АЦП и ЦАП [3].



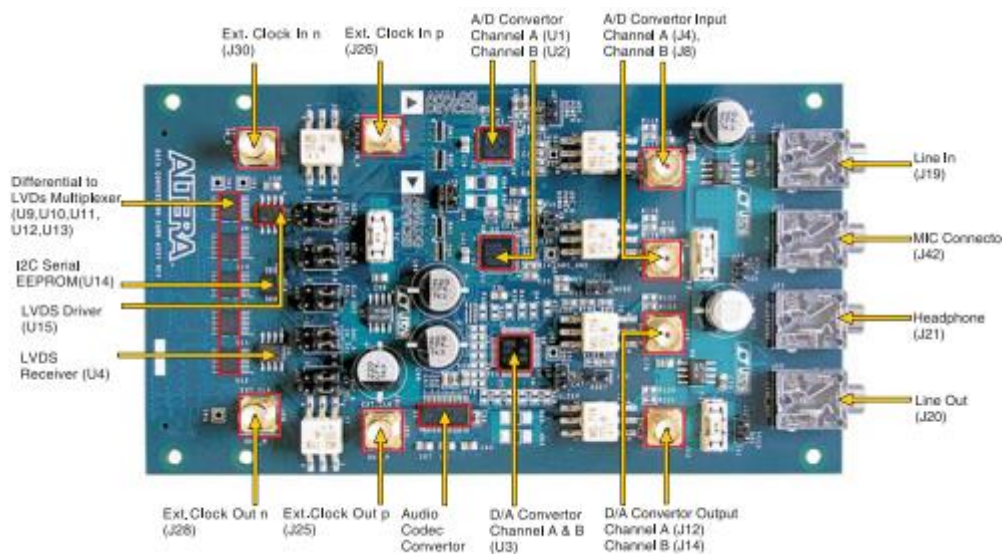


Рис. 1. Внешний вид платы АЦП-ЦАП (вид сверху)

Настройка АЦП с помощью ПЛИС сама по себе уже не является простой задачей. Она осложняется еще и тем, что данная плата АЦП-ЦАП не была рассчитана для настройки с помощью ПЛИС семейства Cyclone IV E. Данная плата была разработана для работы с ПЛИС семейства Cyclone III.

### III. Возможные пути реализации проекта ПЛИС

Как говорилось в предыдущем разделе, данная плата была разработана для ПЛИС семейства Cyclone III. Однако, стоит заметить, что практически у всех отладочных плат от компании «Altera» установлен один и тот же разъем HSMC (High Speed Mezzanine Card – Высокоскоростной мезаниновый разъем), внешний вид которого представлен на рис. 2 [3].

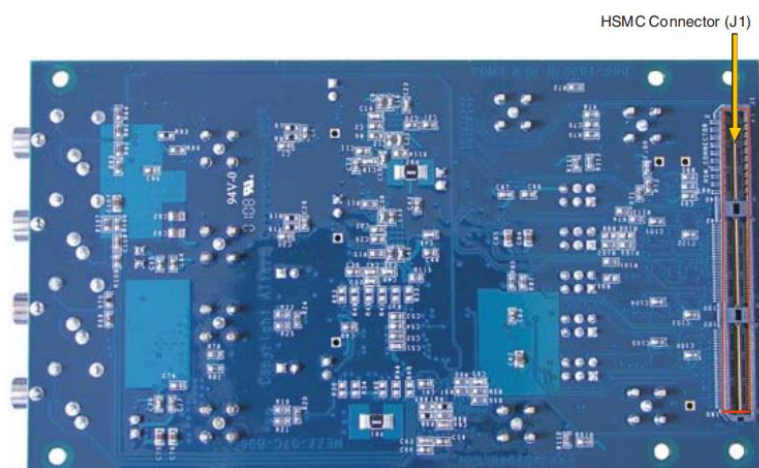


Рис. 2. Внешний вид разъема HSMC

Стоит также отметить и то, что у каждого контакта на этом разъеме одно и то же назначение независимо от вида ПЛИС. Убедиться в этом можно, прочитав техническое описание данной платы АЦП-ЦАП. Таким образом, можно направить сигнал от АЦП в кристалл ПЛИС, а также направить сигналы управления от нее на АЦП.



На плате присутствуют два АЦП AD9254. На рис. 1 они обозначены, как U1 и U2. Они независимы друг от друга. Также еще на этой плате есть ЦАП DAC5672, обозначен, как U3. Он является двухканальным: это позволяет оценить работу сразу двух АЦП, установленных на данной плате [3].

Теперь рассмотрим, как можно осуществить настройку АЦП. Для этого рассмотрим схему электрическую принципиальную. Схема достаточно громоздкая, поэтому изучим ее по частям. Начнем с того, как подается аналоговый сигнал на входы АЦП. Схема электрическая принципиальная устройства для подачи аналогового сигнала на входы АЦП представлена на рис. 3 [4].

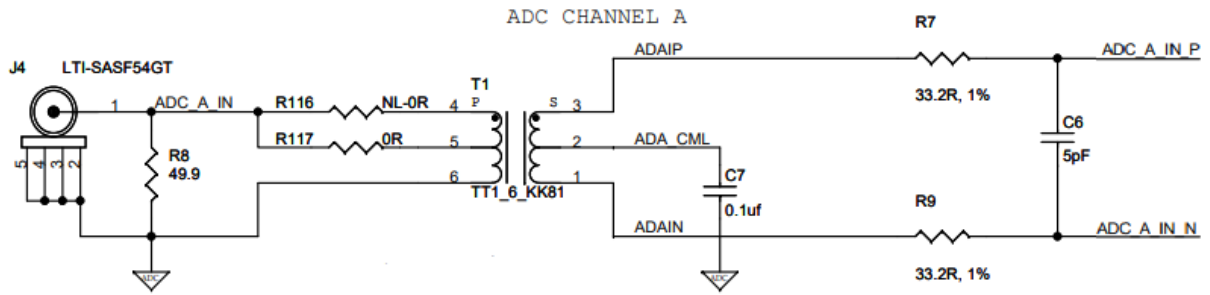


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная устройства ввода аналогового сигнала на АЦП

Итак, дискретизируемый сигнал, т.е. обрабатываемый аналоговый сигнал, можно подать на входы АЦП с помощью SMA-разъема (Subminiature, version A – субминиатюрный коаксиальный соединитель), который обозначен, как J4. Далее аналоговый сигнал поступает на входы VIN+ (контакт АЦП №30) и VIN- (контакт АЦП №31) по линиям ADC\_A\_IN\_P и ADC\_A\_IN\_N соответственно. VIN в данной схеме – это входное напряжение. Схема назначения контактов у АЦП AD9254 представлена на рис. 4 [5].

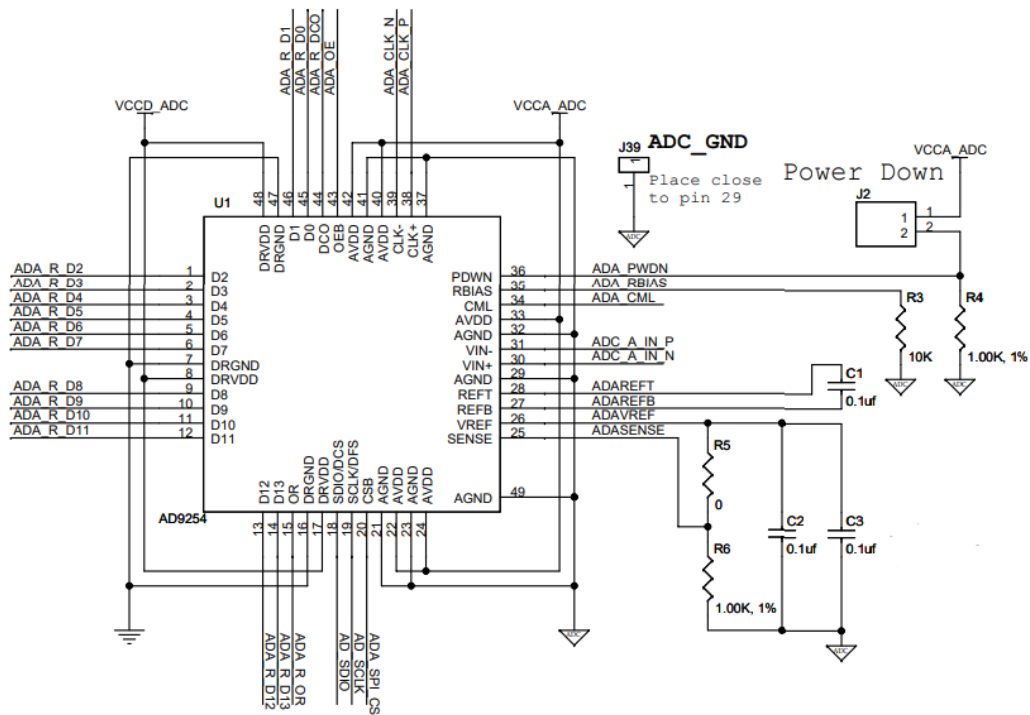


Рис. 4. Схема назначения контактов у АЦП AD9254

Теперь рассмотрим, каким образом возможно подать на входы АЦП уже дискретизирующие импульсы, т. е. те импульсы, которые уже выполняют дискретизацию аналогового сигнала. В этом случае возможны 2 варианта подачи дискретизирующего сигнала.

Первый вариант состоит в том, что подать данный сигнал возможно с помощью ПЛИС. На плате присутствует мультиплексор ICS854054, обозначенный, как U9. Для того чтобы направить сигнал от ПЛИС через мультиплексор, нужно на переключке J3 соединить между собой контакты 3 и 5 и 4 и 6 (см. рис. 5) [4].

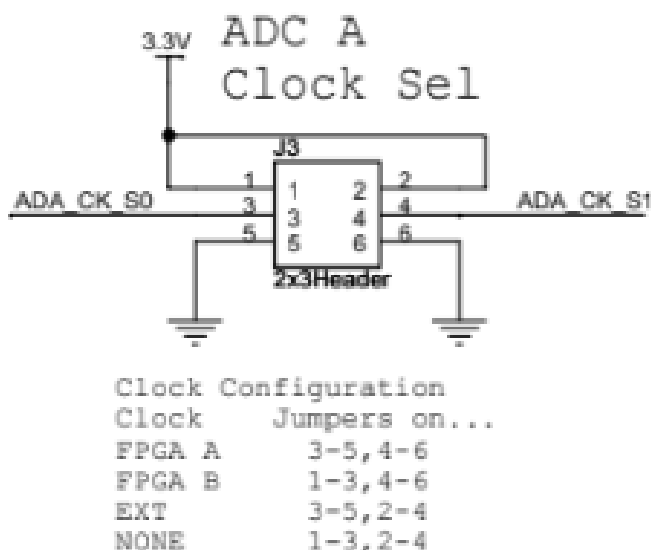


Рис. 5. Назначение контактов у переключки J3

Второй вариант состоит в том, что дискретизирующий сигнал можно подать с помощью внешнего генератора. Для этого нужно подключить к SMA-разъемам J26 и J30 внешний генератор тактовых импульсов. Сигнал будет проходить по линиям XT\_IN\_P и XT\_IN\_N к мультиплексору ICS854054. Но чтобы сигнал прошел дальше к контактам VIN + и VIN -, нужно на переключке соединить между собой контакты 3 и 5 и 2 и 4 на переключке J3 (см. рис. 5).

Также стоит отметить, что настройку АЦП можно осуществить с помощью SPI-интерфейса (Serial Peripheral Interface - последовательный синхронный стандарт передачи данных в режиме полного дуплекса). У АЦП есть следующие контакты для работы с SPI-интерфейсом:

- SDIO/DCS (Serial Port Interface Data Input/Output – контакт ввода/вывода данных с регистров; Duty Cycle Stabilizer Select – контакт синхронизации данных, поступающих или выводящихся с регистров).
- SCLK/DFS (Serial Port Interface Clock/Data Format Select – контакт для подачи тактового сигнала на сдвиговые регистры в SPI-интерфейсе; контакт выбора сдвигового регистра в SPI-интерфейсе для подачи данных).
- CSB (Serial Port Interface Chip Select – выбор исполнительного чипа для работы с SPI – интерфейсом).

Благодаря контактам на АЦП, перечисленным выше, есть возможность настраивать значение опорного напряжения (VREF) и вносить корректировки в точности измерения принимаемых сигналов с помощью настройки через SPI-интерфейс. Более подробно ознакомиться с возможностями настройки данного АЦП можно, изучив техническое описание АЦП AD9254.

#### IV. Заключение

В данной статье было рассмотрено устройство платы Data Conversion HSMC от компании «Altera». В ходе проведенного анализа данной платы были сделаны выводы о том, каким должен быть проект ПЛИС для настройки АЦП и для вывода с него информации на ПЛИС. В ходе проведенного анализа я столкнулся с той трудностью, что русскоязычной литературы или источников, которые бы описывали хотя бы похожие платы, практически нет.

#### Библиографический список

1. Analog Devices. Техническое описание АЦП AD9254. URL: <https://www.rlocman.ru/datasheet/pdf.html?di=125283> (дата обращения: 24.03.2023).
2. Texas Instruments. Техническое описание ЦАП DAC5672. URL: <https://www.rlocman.ru/datasheet/data.html?di=290703&/DAC5672> (дата обращения: 24.03.2023).
3. Altera. Плата Data Conversion HSMC. Руководство пользователя. URL: <https://altera.manymanuals.com/measuring-instruments/data-conversion-hsmc/user-manual-46666> (Дата обращения: 24.03.2023)
4. Altera. Альбом схем платы Data Conversion HSMC. URL: [https://community.intel.com/cipcp26785/attachments/cipcp26785/programmable-devices/57260/1/data\\_conversion\\_hsmc\\_0a\\_pg5.pdf](https://community.intel.com/cipcp26785/attachments/cipcp26785/programmable-devices/57260/1/data_conversion_hsmc_0a_pg5.pdf) (Дата обращения: 24.03.2023)

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. В. Ермаков, А. П. Аверченко, 2023

УДК 621.396

*А. Р. Закирова, А. В. Гетман*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

#### ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОКОЛА L2TP ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ ЧАСТНОЙ СЕТИ

**Аннотация.** В этой статье представлен обзор протокола туннелирования второго уровня (Layer 2 Tunneling Protocol), широко используемого сетевого протокола для создания виртуальных частных сетей (Virtual Private Network). Статья начинается с обсуждения основных принципов L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol), включая его архитектуру и механизмы туннелирования. Далее в статье рассматриваются преимущества и недостатки L2TP. Наконец, в статье рассматриваются практические применения L2TP в различных условиях, включая корпоративные сети, сети поставщиков услуг. Благодаря этому всестороннему анализу статья дает ценную информацию о внутренней работе L2TP и ее роли в современных сетевых технологиях.

**Ключевые слова:** VPN (Virtual Private Network), L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol), IPSec (IP Security), PPTP (Point-to-Point Tunneling Protocol).

## **I. Введение**

Виртуальные частные сети (VPN – Virtual Private Network) приобрели популярность в последние годы из-за растущей потребности в безопасных и частных подключениях к сети Интернет. Потребность в безопасном подключении испытывают многие организации. Так, например, для обмена данными между филиалами можно реализовать физическую сеть, но такая сеть требует больших затрат на закупку оборудования, настройку и поддержание. Доступной альтернативой является использование виртуальных частных сетей, которые получили широкое распространение в последние годы и не требуют организации новой инфраструктуры. Также, VPN используют шифрование и полезны для поддержания безопасного соединения между различными филиалами или для подключения удаленных сотрудников. Цель этой статьи – рассмотреть протокол L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol) и подчеркнуть его преимущества в обеспечении безопасного и надежного средства подключения к локальной сети организации.

## **II. История L2TP**

При выборе протокола VPN необходимо учитывать возможности оборудования конечных пользователей. Зачастую не все протоколы VPN поддерживаются устройством. В тоже время есть протоколы, которые эффективнее работают в крупных сетях, но малоэффективны для подключения удаленного сотрудника.

Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP) – это сетевой протокол, используемый для создания туннелей VPN между общедоступными сетями. Технология PPTP была разработана компанией Microsoft в 1996 году, по этой причине этот протокол поддерживается на большинстве устройств, что облегчает его интеграцию в сеть, а вычислительные ресурсы необходимые для работы протокола минимальны. В тоже время, протокол PPTP по меркам безопасности уступает современным технологиям. Таким образом, протокол PPTP может быть использован для организации VPN в филиалах, если вычислительные ресурсы устройств ограничены, а передаваемая информация не конфиденциальна.

Layer 2 Forwarding (L2F) – это протокол эстафетной передачи на втором уровне. Этот протокол был разработан для туннелирования трафика протокола PPP (Point-to-Point Protocol). Технология L2F была разработана компанией Cisco и являлась прямым конкурентом для протокола PPTP. В результате этой конкуренции был разработан протокол L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol) [1]

Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP) — это протокол туннелирования второго уровня. Технология PPTP была разработана в 1999 году. Этот протокол во многом схож с PPTP и является компромиссом протоколов PPTP (Microsoft) и L2F (Cisco). L2TP потребляет большие вычислительные ресурсы, чем PPTP, однако является наиболее эффективным для построения корпоративных виртуальных сетей.

## **III. Топология сети, организованной с L2TP**

На рис. 1 изображена схема сети, организованная с использованием L2TP [2]. На схеме изображен сценарий, когда находящийся удаленно терминал, используя ресурсы публичного интернет соединения, подключается к локальной сети организации. Для успешного соединения, выполняется следующий алгоритм.

Client инициирует PPPoE (Point-to-point protocol over Ethernet). LAC (L2TP Access Concentrator) и клиент начинают согласование LCP (Link Control Protocol – протокол управления соединением), после этого устанавливается CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol). LAC проверяет, следует ли пересылать сеанс клиента на LNS (L2TP Network Server) на основе полученного доменного имени. Проверка будет выполняться с помощью RADIUS (Remote Authentication in Dial-In User Service). RADIUS-server проверит установленные политики и если Client обладает разрешениями для подключения, то RADIUS

отправит разрешающее ответное сообщение. Затем, LAC устанавливает туннель L2TP, а LNS проверяет, разрешено ли LAC открывать туннель и запускать процесс аутентификации. Теперь туннель запущен и готов к пересылке сеансов VPDN (Virtual Private Dialup Network – Виртуальные частные коммутируемые сети). LAC пересылает согласованные с клиентом параметры LCP, имя пользователя и пароль на LNS. LNS аутентифицирует клиента с помощью RADIUS и отправляет ответ CHAP. Выполняется фаза протокола управления IP (IPCP – Internet Protocol Control Protocol), устанавливаются IP-адреса и маршруты. В этот момент сеанс считается установленным.

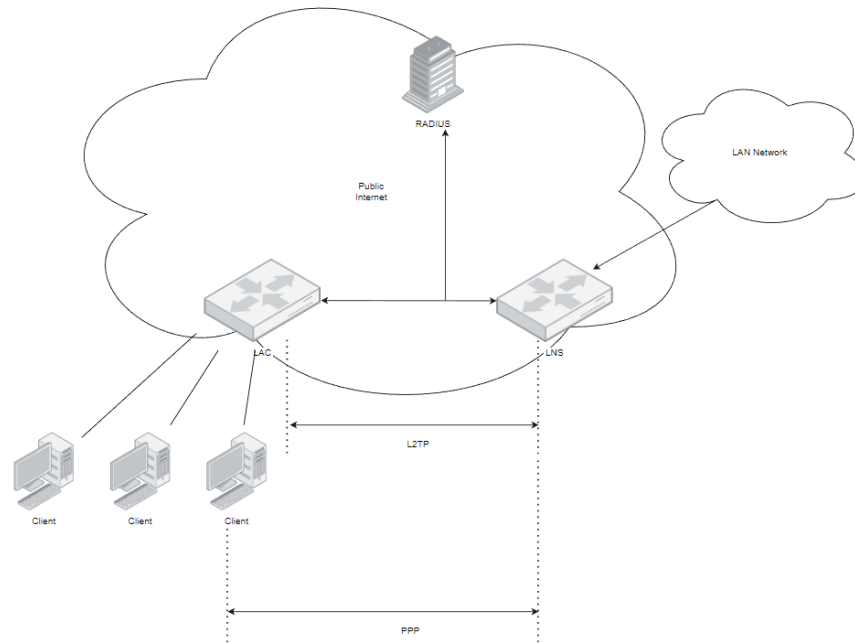


Рис. 1. Схема работы сети L2TP.

Client – удаленная система, например филиал организации, LAC – концентратор доступа L2TP, LNS – сетевой сервер L2TP, RADIUS – сетевой протокол, обеспечивающий централизованную аутентификацию авторизацию и учет используемых сетевых ресурсов [3], PPP – Point-to-Point Protocol [4], LAN – локальная сеть, например главный офис организации

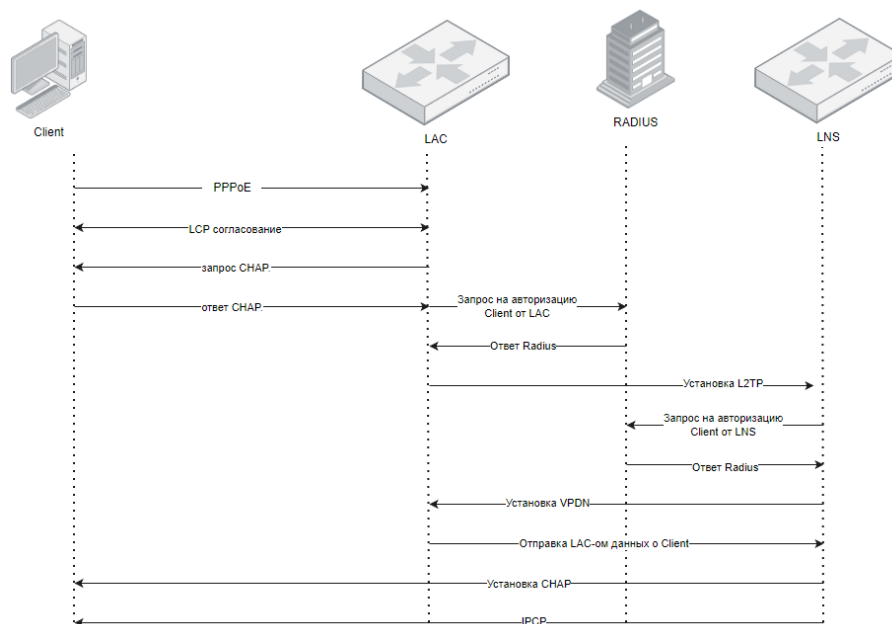


Рис. 2. Алгоритм установления L2TP

#### **IV. Заключение. Достоинства L2TP для организации**

L2TP сочетает в себе преимущества PPTP и L2F и получил широкое распространение. Технология позволяет отдельному сотруднику или небольшому количеству удаленных пользователей получать доступ к внутренней сети организации через общедоступную сеть. L2TP инкапсулирует пакеты PPP для передачи частных данных предприятия по виртуальным каналам, установленным в общедоступной сети. Это освобождает предприятие от аренды дорогостоящих физических линий. Предприятию нужно только управлять пользователями удаленного доступа и пользователями в частной сети, что снижает затраты на обслуживание благодаря упрощенной сетевой архитектуре. L2TP предоставляет удобные, безопасные и надежные услуги доступа для удаленных пользователей и дает следующие преимущества [5]:

- Гибкая аутентификация личности и высокий уровень безопасности.
- Использование функции безопасности PPP, такие как PAP (Password Authentication Protocol) и CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol) [3], для аутентификации пользователя [6].
  - Передача сообщений в зашифрованном виде и поддержка туннельной аутентификации.
  - Совместим с протоколами IPSec для обеспечения высокой безопасности передачи данных.
  - L2TP предлагает два метода аутентификации для управления пользователями доступом: локальная аутентификация и аутентификация RADIUS с использованием имени пользователя и пароля, отправленных пользователем.
  - Возможность резервного подключения LNS. Когда первичный LNS недоступен, LAC может установить новое соединение с вторичным LNS. Это повышает надежность услуг VPN.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Лутченко Сергей Святославович, Омский государственный технический университет.

#### **Библиографический список**

1. Cisco Layer Two Forwarding (Protocol) "L2F" // rfc-editor URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2341> (дата обращения: 25.03.2023).
2. LAC and LNS setup with Cisco as LAC // mikrotik URL: <https://help.mikrotik.com/docs/display/ROS/LAC+and+LNS+setup+with+Cisco+as+LAC> (дата обращения: 25.03.2023).
3. Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS) // rfc-editor URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2138> (дата обращения: 25.03.2023).
4. The Point-to-Point Protocol (PPP) // rfc-editor URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1661> (дата обращения: 25.03.2023).
5. Overview of L2TP // huawei URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100033725/83e5177f/overview-of-l2tp> (дата обращения: 25.03.2023).
6. PPP Challenge Handshake Authentication Protocol (CHAP) // rfc-editor URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1994> (дата обращения: 25.03.2023).

*Дата поступления статьи: 25.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 04.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. Р. Закирова, А. В. Гетман, 2023

Ю. Ю. Крахоткин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## БОРЬБА С ПОМЕХАМИ МЕТОДОМ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

**Аннотация.** В статье рассмотрены существующие методы повышения помехозащищенности, подробнее всего рассмотрен способ псевдослучайной перестройки частоты. Сделаны выводы о возможности использования метода псевдослучайной перестройки частоты для организации помехоустойчивой связи.

**Ключевые слова:** помехи, псевдослучайная перестройка частоты, спектр, метод.

### I. Введение

В настоящее время у конструкторов систем радиосвязи появляется проблема разработки систем связи, которые обязаны обеспечивать надёжную защиту при обмене информацией. При этом система обязана работать во всевозможных условиях и быть устойчива к разнообразным видам помех, как преднамеренных, так и естественных. Для решения данной проблемы могут применяться сигналы с расширением спектра (диапазона).

### II. Анализ методов борьбы с помехами

Суть способа расширения диапазона сигналов такова: расширение диапазона сигнала — это метод передачи, при котором сигнал занимает полосу частот более обширную чем нужна для передачи информации. Расширение полосы частот сигнала обеспечивается особым кодом. Для последующего сжатия полосы частот сигнала и восстановления информации в приемном устройстве также применяется особый код, такой же, как и на передатчике [1].

Основной частью теории для разработки систем с расширенным спектром является теорема К.Е. Шеннона, благодаря которой характеризуется предельный потенциал гауссовского канала.

$$C = W_s \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{P_j} \right) \quad (1)$$

где  $P_j$  – мощность преднамеренных помех,  $P_s$  – средняя мощность сигнала,  $W_s$  – полоса пропускания канала.

Из формулы К. Шеннона следует, что пропускная способность канала передачи данных, для работы в условиях преднамеренных помех, может обеспечиваться при функционировании широкой полосы частот. Из этого можно сделать вывод что, между полосой пропускания и соотношением сигнал-помеха в канале возможно реализовать взаимообмен. При этом в соответствии с формулой (1) более целесообразным будет обмен мощности сигнала на полосу пропускания канала.

Макаренко в своей монограмме выделяет такие широко известные базовые способы расширения диапазона сигналов как:

«Метод непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП). Метод псевдослучайной (программной) перестройки рабочей частоты (ППРЧ). Метод псевдо-временной импульсной модуляции (ПВИМ). Метод комбинированного применения различных способов расширения диапазона» [2].

Псевдослучайная (программная) перестройка рабочей частоты является наиболее востребованным и эффективным методом борьбы с помехами. При использовании ППРЧ расширение диапазона обеспечивается скачками по частотам в выделенном диапазоне. Под

скачками по частотам подразумевается перестройка одной частоты либо нескольких частот, которые используются для передачи сигналов [3].

Существует несколько разновидностей режима программной перестройки частоты. На рис. 1 представлена классификация радиолиний, использующих ППРЧ.



Рис. 1. Классификация радиолиний с ППРЧ

По скорости переключения рабочих частот радиолинии с ППРЧ делятся на радиолинии с медленной ППРЧ и радиолинии с быстрой ППРЧ. Если в радиолинии рабочие частоты перестраиваются со скоростью большей, чем, скорость передачи информации, то такую радиолинию можно отнести к радиолиниям с быстрой ППРЧ. В таких радиолиниях, в основном, применяют сигналы, выполненные в виде частотно - временных матриц.



По ширине полосы, в которой происходит перестройка рабочих частот, радиолинии делятся на линии с широкополосной и узкополосной ППРЧ. Радиолинии, у которых перестройка рабочей частоты происходит в границах полосы пропускания причисляются к радиолиниям с узкополосной ППРЧ. В радиолиниях с широкополосной ППРЧ в отличие от узкополосной ППРЧ перестройка частот осуществляется в значительно более широких полосах, чем полоса пропускания трактов радиоприемника и радиопередатчика. Как правило, радиолинии с быстрой ППРЧ являются узкополосными. А радиолинии с медленной ППРЧ в большинстве случаев являются широкополосными.

По способу использования частотного ресурса радиолинии с ППРЧ делятся на синхронные и асинхронные. В синхронных радиолиниях с ППРЧ установление частот каждой радиолинии проводится с учетом ранее выделенных частот. В асинхронных радиолиниях с ППРЧ частоты программной перестройки каждой радиолинии назначаются свободно от назначения частот иным радиолиниям. Использование синхронных радиолиний с ППРЧ предпочтительнее, чем асинхронных с точки зрения электромагнитной совместимости.

По способу синхронизации радиолинии с ППРЧ делят на радиолинии, в которых используется единое время и не используется единое время для синхронизации. Если единое время не используется, то синхронизацию производят по специальным командам, которые отправляются по радиолинии.

### **III. Заключение**

Учитывая вышеизложенное, целесообразнее выбрать режим медленной ППРЧ для повышения помехозащищенности функционирования линии связи в условиях сложной сигнальной и помеховой обстановки. Это решение обусловлено большей помехозащищенностью медленной ППРЧ в сравнении с быстрой ППРЧ, так как быстрая ППРЧ, практически всегда, реализуется в узком диапазоне частот, а это как правило облегчает ее подавление заградительными шумовыми помехами.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Коровин Сергей Дмитриевич, Омский государственный технический университет.

### **Библиографический список**

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / под ред. В.И. Борисова. 2-е изд. М.: РадиоСофт, 2008. 512 с.
2. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
3. Ершов Р.А., Морозов О.А., Фидельман В.Р. Оценка взаимной временной задержки сигналов с псевдослучайной скачкообразной перестройкой частоты // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 2. С. 157–166.

*Дата поступления статьи: 27.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 03.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Ю. Ю. Крахоткин, 2023

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦРРЛ НА УЧАСТКЕ «ОМСК - КОРМИЛОВКА»

**Аннотация.** В данной работе рассматривается проектирование цифровой радиорелейной линии на участке «Омск–Кормиловка» Приведены основные особенности проектирования радиорелейной линии, в частности, и на частоте на частоте 8 ГГц. Были выбраны оборудование радиорелейной вышки МИК-РЛ8Р и проведен расчет трассы с использованием программы ProfEdit.

**Ключевые слова:** радиорелейная связь, диапазон 8 ГГц, радиорелейная линия связи трасса «Омск–Кормиловка»

### 1. Введение

Линии радиорелейной связи представляют собой неотъемлемый элемент современной телекоммуникационной инфраструктуры. Они обеспечивают передачу данных на значительные расстояния с высокой скоростью и качеством. В критических ситуациях линии радиорелейной связи могут использоваться для быстрого и надежного обмена данными между различными объектами. Благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая производительность, широкополосность и надежность, линии радиорелейной связи широко применяются в различных областях, таких как телекоммуникации, оборонная промышленность, медицинские учреждения, научные и исследовательские центры и другие сферы деятельности.

Радиорелейная связь имеет несколько преимуществ в России. Во-первых, она является более экономически выгодной, поскольку не требует больших капиталовложений в развитие инфраструктуры вблизи центров передачи, приёма и обработки сигнала. Это особенно важно на необжитых территориях, где обустройство традиционной проводной инфраструктуры может быть очень дорогостоящим.

Во-вторых, линии радиорелейной связи легко масштабируются и могут быть быстро введены в эксплуатацию. Это делает их очень полезными в критических ситуациях, когда требуется быстрый и надежный обмен данными между различными объектами.

Кроме того, радиорелейная связь обладает высокой скоростью передачи данных и качеством сигнала, что делает ее эффективным средством для передачи больших объемов информации на большие расстояния.

Наконец, радиорелейная связь гораздо проще в обслуживании, чем системы спутниковой связи, и не требует специальных знаний и навыков для ее установки и настройки.

Действительно, использование современных технологий производства позволило существенно улучшить технические параметры радиорелейной связи. Например, применение диапазонов частот свыше 10 ГГц позволяет передавать больший объем данных на большие расстояния с более высокой скоростью и качеством, а также сократить задержку в передаче информации.

Сокращение габаритов, веса и энергопотребления аппаратуры радиорелейных линий, в свою очередь, позволяет более эффективно использовать ресурсы и снизить затраты на строительство и эксплуатацию таких линий. Кроме того, повышение надежности аппаратуры уменьшает вероятность возникновения сбоев и снижения качества передачи информации. В целом, современные технологии позволяют использовать радиорелейную связь в различных сферах, обеспечивая быструю и надежную передачу данных на большие расстояния.

## **II. Сферы применения**

Применение радиорелейных линий (РРЛ) в настоящее время включает не только транспортировку данных для сельских и внутриобластных сетей связи, но и другие области, такие как:

- **Транспортная инфраструктура.** РРЛ используются для передачи информации между различными транспортными объектами, такими как поезда, автомобили и самолеты. Это обеспечивает связь между диспетчерскими центрами и транспортными объектами для управления и контроля их движения.
- **Телевидение и радиовещание:** РРЛ используются для передачи телевизионных и радио сигналов между студиями и передатчиками, а также для обеспечения связи съёмочных групп на местности.
- **Бизнес-сектор:** РРЛ используются для связи между офисами и предприятиями в разных местах, а также для связи сотрудников, работающих на удаленных объектах.
- **Государственные структуры:** РРЛ используются для связи между различными государственными структурами, такими как полиция, пожарные, скорая помощь и армия, для координации и управления действиями в критических ситуациях.
- **Энергетика:** РРЛ используются для передачи информации между различными объектами энергетических сетей, такими как генераторы, подстанции и распределительные центры, для управления энергосистемой.

## **III. Факторы, влияющие на эффективность радиорелейных линий связи**

При проектировании радиорелейных линий необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на эффективность и надежность системы связи. Некоторые из этих факторов включают:

- **Частотный диапазон:** выбор частоты зависит от многих факторов, включая доступность частотного диапазона, требования к пропускной способности, дальности передачи и прочности сигнала в зависимости от топографии местности.
- **Высота установки антенн:** высота установки антенн определяется географическими условиями, например, наличием гор, холмов и других препятствий, которые могут мешать передаче сигнала. Высота установки антенн также влияет на пропускную способность и дальность передачи.
- **Топография местности:** топография местности, такая как горы, леса и здания, может оказывать влияние на передачу сигнала и требовать дополнительных усилий для обеспечения надежности и качества связи.
- **Погодные условия:** погодные условия, такие как дождь, снег и туман, могут оказывать влияние на передачу сигнала и требуют учета в проектировании РРЛ.
- **Расстояние между станциями:** расстояние между станциями определяет требования к мощности передатчика и чувствительности приемника, а также возможность использования ретрансляторов для повышения надежности связи.
- **Количественные требования к пропускной способности и надежности:** требования к пропускной способности и надежности связи также являются важными факторами, влияющими на выбор технологии и конфигурации РРЛ.
- **Бюджет:** бюджет также является важным фактором при проектировании РРЛ, поскольку он определяет доступные технологии и оборудование, а также количество станций и мощность передатчика.
- **Требования к защите информации:** в зависимости от требований к безопасности и защите информации, могут использоваться различные технологии шифрования.

#### IV. Особенности проектирования ЦРРЛ на 8 ГГц

Проектирование РРЛ на частоте 8 ГГц имеет свои особенности, которые связаны с характеристиками радиоволн на данной частоте. Некоторые из них включают в себя:

- Высокая директивность антенн: на частоте 8 ГГц длина волны составляет около 3,75 см, что делает антенны РРЛ крайне директивными. Поэтому для обеспечения надежной связи между РРЛ необходимо обеспечить точное выравнивание антенн и учесть возможные препятствия на пути распространения сигнала.
- Ограничения на расстояние между узлами связи: на частоте 8 ГГц радиоволны имеют более высокую дисперсию, что означает, что сигналы сильнее затухают и деградируют на больших расстояниях. Это ограничивает максимальное расстояние между узлами связи и требует установки РРЛ на определенном расстоянии друг от друга.
- Высокая чувствительность к интерференции: на частоте 8 ГГц РРЛ становятся более чувствительными к радиопомехам от других источников, таких как другие РРЛ, мобильные телефоны и т.д. Поэтому необходимо учитывать возможные источники помех и использовать защитные методы, такие как шумоподавление и подавление помех.
- Точность калибровки: на частоте 8 ГГц точность калибровки РРЛ становится критически важной, так как даже небольшие ошибки в измерении угла и расстояния между узлами могут привести к значительной деградации сигнала.

В целом, проектирование РРЛ на частоте 8 ГГц требует более тщательного подхода и учета особенностей радиоволн на данной частоте, чтобы обеспечить надежную и эффективную связь.

#### V. Выбор оборудования

При проектировании трассы передачи информации важно учитывать несколько факторов, включая объем передаваемой информации, энергетические параметры оборудования, длину пролётов и климатические условия. Оптимальным выбором для такой трассы может стать использование среднескоростной цифровой радиорелейной линии (ЦРРЛ) на основе аппаратуры МИК-РЛ8Р. В таблице 4 приведены основные параметры этой аппаратуры.

Радиорелейная аппаратура «МИК-РЛ8» предназначена для организации зоновых, местных и технологических систем связи и передачи в диапазоне 7,9–8,4 ГГц. Аппаратура обладает высокой гибкостью и обеспечивает построение как однопролетных, так и многопролетных РРЛ с произвольной топологией сети, со скоростями передачи цифровых потоков 2.048, 8.448 и 34.368 Мбит/с. Разработанная аппаратура входит в унифицированную цифровую радиорелейную систему нового поколения диапазона 8...40 ГГц.

Таблица 1

#### Основные технические характеристики аппаратуры МИК-РЛ8Р

Рабочий диапазон частот, ГГц	7,9...8,4
Пропускная способность	Е1, Е2, Е3
Цифровые сервисные каналы, Кбит/с	4*64
Число пролётов РРЛ охваченных ТУ-ТС	>16
Разнос частот между стволами, МГц	3,5
Масса, кг	12, 22
Напряжение сети, В	±39...± 72
Энергопотребление сети РРС для Е2, Вт	10/15
Рабочая температура, С°	-50...+50

Состав радиорелейного оборудования МИК-РЛ может значительно различаться в зависимости от ее назначения и конфигурации системы. Но в любом случае оно

подразделяется на внутреннее оборудование (IDU) и выносное (ODU). Для многопролетных систем дополнительно необходима система телеуправления и телесигнализации (ТУ ТС). В состав выносного оборудования входят: антенное устройство (АУ); одно или два приемопередающих устройства (ППУ); соединительные кабели. Антенные устройства позволяют одновременно принимать и передавать в двух ортогональных линейных поляризациях. Высокочастотным интерфейсом АУ является коаксиальный разъем с сечением 7/3.05 мм. В диапазоне 7,9–8,4 ГГц используются двухзеркальные антенные системы с диаметром зеркала 1 м и 0,6 м, что позволяет осуществить заднее размещение приемопередающего устройства. Антенна с диаметром 1 м выполнена по схеме Кассегрена, а антенна с диаметром 0,6 м представляет собой антенну со смещенной фокальной плоскостью (типа АДЭ). Простой и надежный механизм позволяет производить юстировку антенного устройства по углу места и азимуту. Для антенны с диаметром зеркала 0,6 м имеется вариант поставки с радиопрозрачным обтекателем.

## VI. Расчет трассы

Для проектирования профиля пролета "Омск – Кормиловка" на частоте 8 ГГц была использована программа ProfEdit, а также данные о технических параметрах аппаратуры цифровой радиорелейной вышки из таблицы 1. В ходе работы были учтены различные факторы, включая географические условия и особенности местности.



Рис. 1. Пункты на карте MAPLINK

Далее произведем энергетический расчёт трассы, результаты оформим в таблицу 2.

Таблица 2

### Расчеты ЦРРЛ

Величина	R0, км	K, ед	H0, м	$\Delta H(\bar{g})$ , м	H(0), м	V
	36,4	0,45	10,7	8,21	2,49	2,15

## VII. Заключение

В результате проведенного проектирования ЦРРЛ на участке «Омск–Кормиловка» были рассмотрены особенности проектирования на частоте 8 ГГц, выбрано оборудование радиорелейной вышки МИК-РЛ8Р и проведен расчет трассы, включающий в себя проектирование профиля пролета в программе ProfEdit и расчет параметров просвета и ослабления сигнала. Важным результатом является определение необходимых характеристик и параметров для создания надежной и эффективной ЦРРЛ связи на данном участке.

Научный руководитель: доц., к.т.н. Никонов Игорь Валентинович, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Цифровая радиорелейная станция МИК-РЛ4...15Р+. URL: <https://www.rus-telcom.ru/product/mik-rl415rplus/teh/#> (дата обращения: 27.03.2023).

*Дата поступления статьи: 04.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 13.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Б. А. Кусаинов, М. В. Русских, 2023

УДК 621.592.0

*Е. С. Ласунов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Аннотация.** В данной статье представлены некоторые возможности методов предиктивной аналитики для обеспечения надежности оборудования на основе анализа временных рядов ключевых характеристик радиоэлектронных средств (РЭС). Обработка таких статистических данных методами машинного обучения (МО) позволяет предсказывать изменение параметров на перспективу, что создаёт основу для прогнозирования возникновения сбоев и отказов оборудования. Для эксперимента в качестве объекта исследования была выбрана радиостанция с такими контролируруемыми параметрами, как: напряжение питания, мощность передатчика, коэффициент стоячей волны (КСВ), чувствительность приёмника, отношение сигнал/шум (ОСШ) на входе приёмника. К результатам работы относятся наборы синтетических данных контролируемых параметров, а также модели прогнозирования изменений их значений во времени.

**Ключевые слова:** прогнозная аналитика, машинное обучение, Python, модели прогнозирования, радиостанция, отказ.

### I. Введение

Предиктивная (прогнозная) аналитика – это ветвь аналитики данных, которая использует статистические алгоритмы и методы машинного обучения для анализа данных и прогнозирования будущих результатов. Он включает в себя интеллектуальный анализ данных, МО и методы статистического моделирования, позволяющие получить представление о прошлых и текущих данных и прогнозировать грядущие тенденции и поведение.

Одним из значительных преимуществ прогнозной аналитики является ее способность выявлять закономерности и тенденции в больших объемах данных, которые в противном случае остались бы незамеченными. Прогнозные модели можно использовать для анализа данных из различных источников, которыми могут служить как уже структурированная

информация в цифровом табличном виде (датасет), так и, например, карточки учета неисправностей техники, предварительно приведенные к «csv» или «xls» форматам.

Машинное обучение – важнейший аспект прогнозной аналитики, который позволил разработать более сложные алгоритмы, способные обучаться и адаптироваться к новым данным. Алгоритмы машинного обучения можно обучать на больших наборах данных для выявления закономерностей и взаимосвязей, которые затем можно использовать для точного прогнозирования будущих результатов.

На основе прогноза изменения характеристик во времени можно реализовать функционал по определению момента возникновения отказа, что может быть использовано как основа для перехода от регламентированного технического обслуживания (ТО) к ТО по техническому состоянию.

Для разработки модели были использованы следующие библиотеки Python: «Scikit-Learn» – для машинного обучения, «Pandas» – работы с данными, «Matplotlib» – построения графиков.

## II. Постановка задачи

Целью работы является прогнозирование значений параметров радиостанции, и возможность дать на их основе оценку относительно возможного отказа.

Параметры были выбраны исходя из следующего предположения: изменение напряжение питания будет свидетельствовать о неисправности блока питания, изменения выходной мощности – передающего тракта, повышение КСВ – антенно-фидерной системы, ухудшение ОСШ и чувствительности приёмника будут говорить о неполадках приёмного тракта. Отслеживая характеристики пяти параметров радиостанции, мы можем контролировать ключевые блоки радиостанции, и, как следствие, оценивать её работоспособность.

В качестве объекта испытания была взята условная радиостанция с характеристиками, представленными в таблице 1. Объяснением такого подхода является тот факт, что в открытом доступе отсутствует информация о: выходе из строя отдельных блоков (субблоков) телекоммуникационного оборудования, а также их причинах; измерении параметров радиостанции в течение длительного периода (от 3 месяцев).

Таблица 1

**Технические характеристики радиостанции**

$U_{пит}, В$	$P_{рдду}, Вт$	КСВ	$U_{рпу}, мкВ$	ОСШ, дБ
12	1	1,5	1,2	12

## III. Теоретические сведения

Для разработки моделей прогнозирования был выбран ряд алгоритмов, которые реализованы в библиотеке SciKit-Learn. Рассмотрим кратко каждый из них.

Прогнозирование наивным методом (НМ) – это простой метод прогнозирования, который предполагает, что будущие значения временного ряда будут такими же, как текущее значение или значение предыдущего периода. При этом не учитываются никакие другие факторы или тенденции, которые могут повлиять на данные. Это базовая и простая в реализации модель, которая может быть полезна в качестве эталона для более сложных моделей прогнозирования [1].

Цель линейной регрессии (ЛР) – найти линию, которая лучше всего соответствует данным, путем минимизации суммы квадратов разностей между прогнозируемыми и фактическими значениями [2].

Авторегрессия (АР) – это статистическая модель, которая использует прошлые наблюдения временного ряда для прогнозирования будущих значений. Она основана на

предположении того, что будущее значение переменной является комбинацией ее прошлых значений и ошибки [1].

Метод опорных векторов (МОВ) основан на преобразовании исходных векторов в многомерное пространство и поиске разделяющей гиперплоскости (ГП) с наибольшим зазором. Две параллельных ГП строятся по обеим сторонам гиперплоскости, разделяющей классы. Гиперплоскость с наибольшим расстоянием до параллельных ГП выбирается в качестве разделяющей ГП. Алгоритм предполагает, что больший разрыв между параллельными гиперплоскостями приводит к меньшей средней ошибке классификатора [3].

Для оценки того, насколько разрабатываемая модель хорошо обобщает данные, на которых она построена и как точно делает прогнозы, применяются различные метрики качества. В работе были использованы такие метрики, как средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (MSE), а также коэффициент детерминации (R2). Цель их применения состоит в том, чтобы выбрать модель прогнозирования, которая минимизирует или максимизирует выбранную метрику, указывая на то, что модель делает точные прогнозы и имеет высокую обобщающую способность.

#### IV. Результаты моделирования

Для проведения экспериментов были подготовлены скрипты на языке Python с использованием библиотек, указанных в разделе I. Условия эксперимента: синтетически сгенерированные данные с периодом обучения (тренировочный период) для всех моделей 136 дней, число дней для прогноза (тестовый период) – 45 дней. Далее с помощью разработанного скрипта были обучены модели, описанные в разделе III. Посчитаны метрики качества, результаты приведены в таблицах 2, 3.

В качестве иллюстрации предсказаний моделей рассмотрим графики прогнозирования значений КСВ на период с 01.01.2022 по 30.06.2022 года.

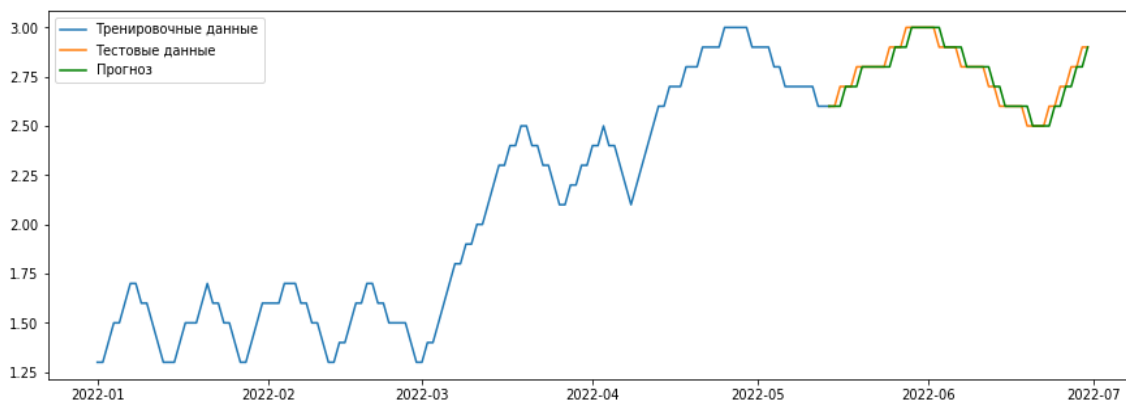


Рис. 1. График прогноза модели НМ

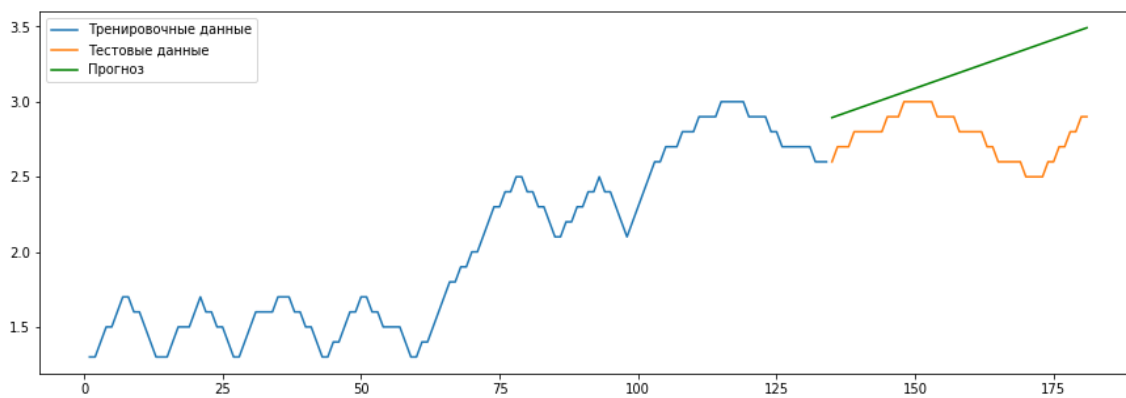


Рис. 2. График прогноза модели ЛР



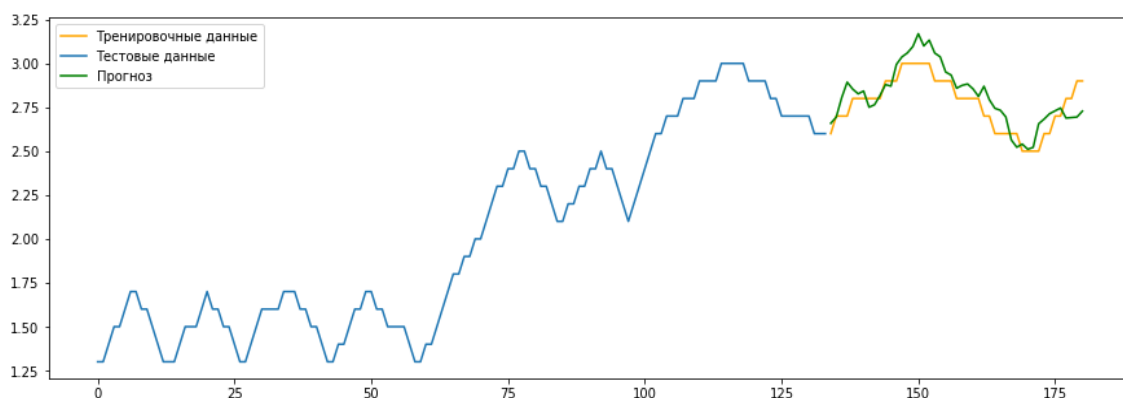


Рис. 3. График прогноза модели AP

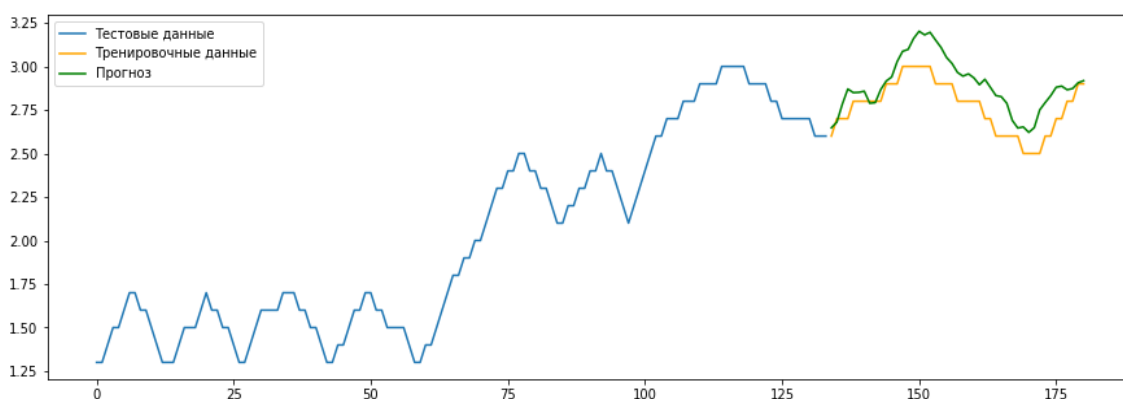


Рис. 4. График прогноза модели МОВ

Таблица 2

**Метрики на тестовой выборке для КСВ**

Модель	MSE	MAE	R2
НМ	0,004	0,035	0,916
ЛР	0,251	0,423	0,379
АР	0,009	0,082	0,572
МОВ	0,021	0,126	0,614

Анализируя полученные результаты, сложно сделать однозначный вывод о том, какая модель точнее, так как мы имеем отличные показатели у модели «наивный метод», но следует принимать во внимание тот факт, что данная модель не покажет хороших результатов, если характеристики будут иметь более случайных характер. «Плохие» характеристики линейной регрессии не говорят об её неприменимости, данная модель хорошо себя показывает в тех случаях, если у временного ряда есть тренд. Поэтому в данном случае оптимальными являются модели: авторегрессия и метод опорных векторов, которые обладают близкими метриками как по точности, так и по коэффициенту детерминации.

Таблица 3

**Метрики на тестовой выборке для напряжения питания**

Модель	MSE	MAE	R2
НМ	0,0050	0,101	0,691
ЛР	0,0030	0,051	0,778
АР	0,0010	0,029	0,917
МОВ	0,0007	0,017	0,999

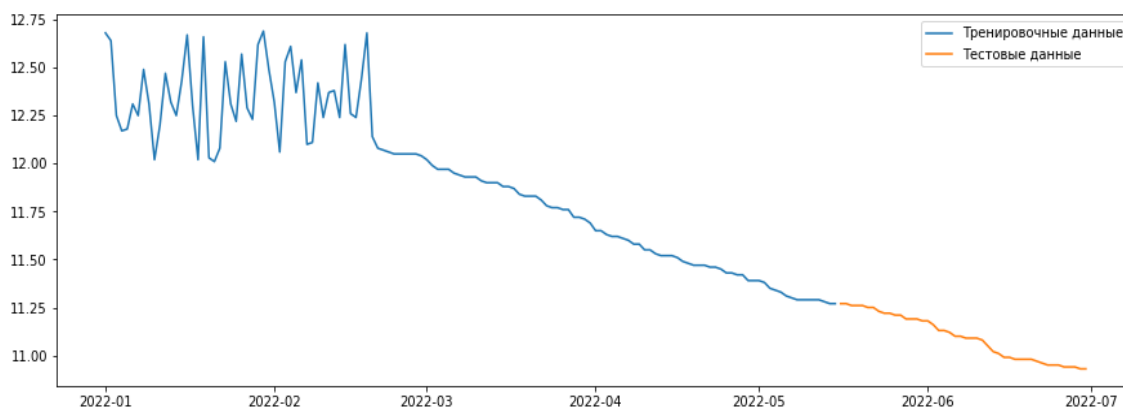


Рис. 5. График временного ряда для напряжения питания

Можно заметить, что при наличии явного тренда, как, например, у напряжения питания на рис. 5, ошибка прогнозирования сокращается, что говорит о хорошей способности модели предсказывать такие зависимости.

В данной ситуации наилучшими показателями обладает модель, обученная на МОВ. Однако, как и было сказано ранее, неплохие данные у модели линейной регрессии.

#### В. Заключение

В работе был представлен подход для прогнозирования характеристик радиостанции, таких как: напряжение питания, мощность передатчика, коэффициент стоячей волны, чувствительность приёмника, отношение сигнал/шум на входе приёмника. Для этого были рассмотрены различные модели, наилучшими на данный момент являются метод опорных векторов и авторегрессия. Однако работа продолжается, она связана с подбором гиперпараметров с целью получения более высоких метрик качества.

Научный руководитель: к.т.н., Любченко Александр Александрович, Омский государственный технический университет.

#### Библиографический список

1. Савинская Д. Н., Кочкарова П. А., Зейн В., Шуняев А. А. Современные методы прогнозирования временных рядов. // Современная экономика: проблемы и решения. 2021. № 11. С. 56–63. ISSN 2078-9017. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/319310> (дата обращения: 24.03.2023).
2. Болодурина И. П., Анциферова Л. М., Гришина Л. С. [и др.]. Интеллектуальная модель прогнозирования интенсивности движения транспортных средств на перекрестке // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 6. С. 69–78. ISSN 2077-7175. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/324770> (дата обращения: 24.03.2023).
3. Баранов А. В., Николаев Д. С. Применение машинного обучения для прогнозирования времени выполнения суперкомпьютерных заданий // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 218–228. ISSN 2311-2735. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/314193> (дата обращения: 24.03.2023).

Дата поступления статьи: 29.03.2023

Дата одобрения после рецензирования: 03.04.2023

Дата принятия к публикации: 19.06.23

© Е. С. Ласунов, 2023

*Д. И. Ломтев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЯЮЩИМ СРЕДАМ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

**Аннотация.** В статье описана разработка программы тестирования по направляющим средам в телекоммуникациях. Программа выполнена для операционной системы windows.

**Ключевые слова:** CLI, программа, тест.

### I. Введение

На сегодняшний день всё чаще стали применяться программы с удобными для пользователя интерфейсами. Программы с упрощённым интерфейсом можно использовать для большинства пользователей, так как пользователю не требуется предварительная подготовка к использованию программы.

Одним из вариантов реализации программы с простым интерфейсом является программа тестирования знаний в той или иной области. Например, тест по полученным знаниям, пройденный студентом, может показать преподавателю и прошедшему тест студенту уровень подготовки к предстоящим экзаменам. Исходя из такого примера была написана программа тестирования по направляющим средам в телекоммуникациях.

### II. Постановка задачи

С помощью данной программы у студентов имеется возможность оценить свои текущие навыки в области предмета, по которому проходит тестирование. В конце теста студент получит оценку в виде количества полученных баллов из максимального количества, которое он мог набрать.

Программа тестирования – один из наиболее распространенных инструментов для выявления знаний, которые имеет пользователь.

Программа состоит из интерфейса пользователя, на котором пользователь, например студент, будет проходить тест и файла настройки программы.

Чтобы выбрать предмет, по которому будет проходить тестирование нужно открыть файл настройки (140D.dll), который должен находиться в корневой папке программы, с помощью текстового редактора. В нём информация поделена на блоки по 8 строк, так первый блок параметров отвечает за некоторые настройки программы, а следующие блоки являются вопросами, один блок равен одному вопросу [1, 2].

В блоке параметров первые две строчки не влияют на программу, и нужны для указания на блок параметров. В 3 строчку записывается максимальное число вопросов, которые подготовлены к тесту. В 4 строчке записывается название теста, которое будет отображаться в интерфейсе пользователя. Остальные строчки в блоке параметров не имеют значения, но для корректной работы программы должны иметь как минимум 1 символ в строке.

```
Параметры
Количество вопросов:
62
Тест "Направляющие среды в телекоммуникациях"
NULL
NULL
NULL
NULL
```

Рис. 1. Блок параметров в файле настройки

В блоке вопроса 1 строка нужна для номера вопроса, чтобы легко можно было найти вопрос, если нужно его редактировать. Во 2 строке нужно написать сам вопрос. С 3 по 6 строки вписываются ответы на вопрос из 2 строки. В 7 строке нужно написать номер правильного ответа, например, если правильный ответ находится в 5 строке, то есть третий вариант, то в строку правильного ответа запишется 3. В 8 строке записывается переменная, которая показывает, есть ли картинка к вопросу, если есть, то записывается 1, если нет, то 0. Если к вопросу прилагается картинка, нужно добавить её в корень с программой и назвать комбинацией из номера вопроса и разрешения .png, пример для 15 вопроса: 15.png [1 – 4].

```

ВОПРОС №15
Определите по рефлектограмме расстояние до конца оптического волокна.
а) 1,5 км.
б) 0,5 км.
в) 2,2 км.
г) 2 км.
3
1

```

Рис. 2. Блок вопроса в файле настройки



Рис. 3. Интерфейс пользователя при выдаче 15 вопроса [4]

Интерфейс пользователя можно запустить на 32-и 64-разрядных системах, в зависимости от выбора файла. При запуске программы для начала теста нужно выбрать количество случайно сгенерированных неповторяющихся вопросов в тесте. Перед выбором можно вызвать руководство пользования программой, кликнув на кнопку “руководство”.

После выбора количества вопросов начинается тестирование. В окне тестирования слева сверху есть поле с номером вопроса, поле с таймером, который при выдаче вопроса сбрасывается до 2 минут и идёт в обратном отсчёте до нуля [1–3].

По центру располагается картинка к вопросу, если она есть, сам вопрос, 4 варианта ответа и кнопки “отказ от ответа”, “ответить”, и “закончить тест”. Отказ от ответа пропускает вопрос, переходя к следующему, если такой есть, при выборе варианта ответа эта кнопка пропадает до следующего вопроса. Кнопка “ответить” активна только при выборе варианта ответа и засчитывает выбранный вариант, сравнивая его с правильным ответом.

Кнопка “закончить тест” пропускает оставшиеся вопросы и выводит окно с результатом прохождения теста.

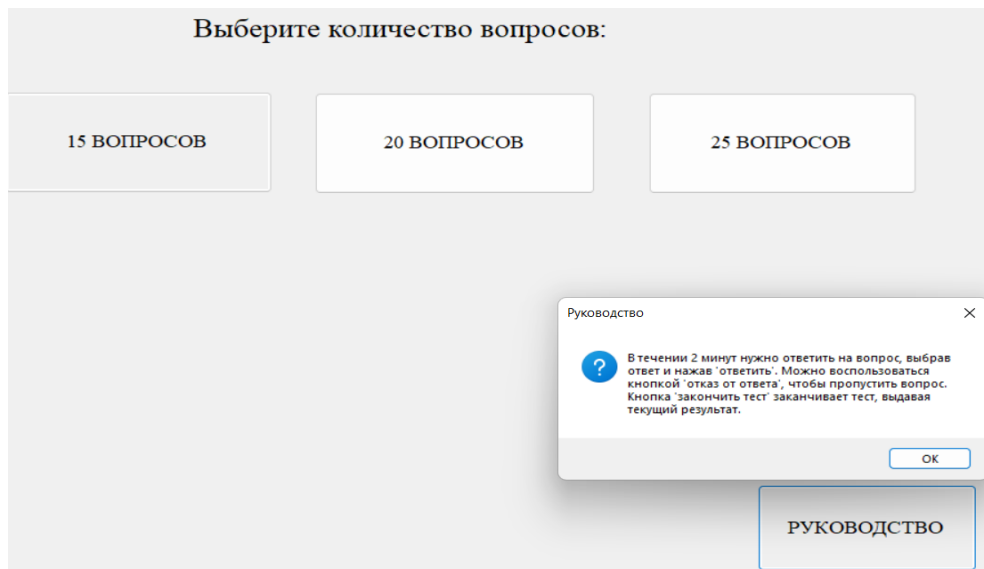


Рис. 4. Интерфейс пользователя при запуске

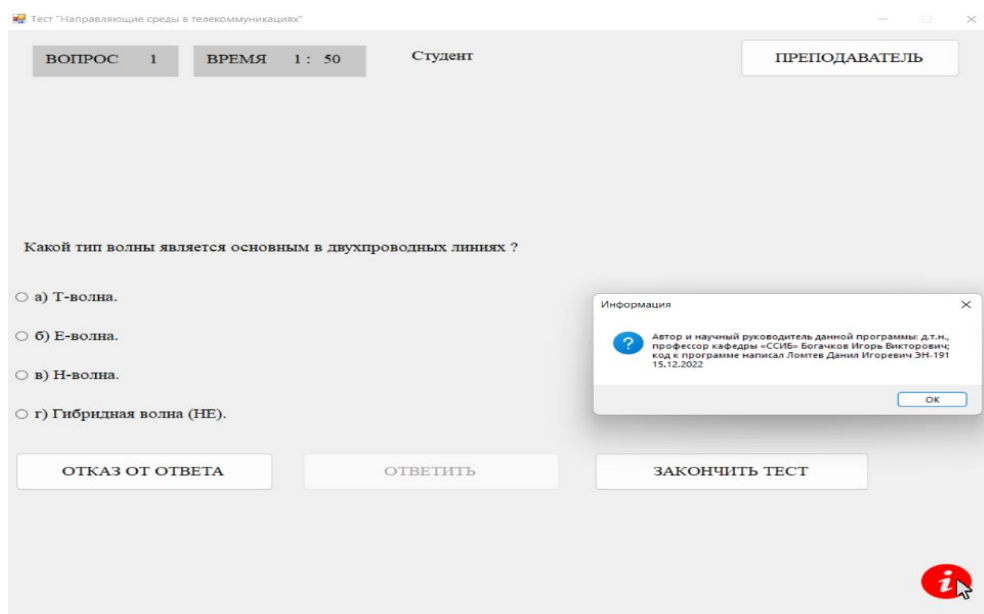


Рис. 5. Интерфейс студента во время тестирования [3]

В правом нижнем углу есть кнопка информации, при нажатии на которую открывается окно информации о разработчиках данной программы.

В правом верхнем углу есть кнопка “преподаватель”, при нажатии на которую появляется окно с авторизацией, и если в нём правильно ввести логин и пароль, то интерфейс изменится на вид для преподавателя.

После успешной авторизации интерфейс пользователя перейдёт в режим преподавателя, в котором помимо всех элементов, которые были раньше, снизу добавляются поля с количеством правильных ответов на данный момент, правильный ответ к данному вопросу, предварительная оценка, основанная на проценте верных ответов из выбранного количества вопросов, балл за время (1 при таймере от 2 минут до 0), номер вопроса из файла

параметров и случайно сгенерированный список номеров вопросов. Также в самом низу есть возможность ввести желаемый вопрос, чтобы сразу вывести его в интерфейс для отладки.

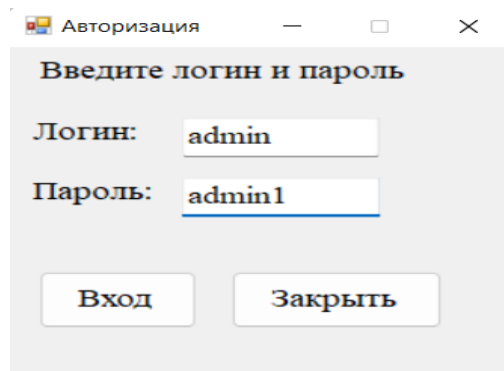


Рис. 6. Окно авторизации

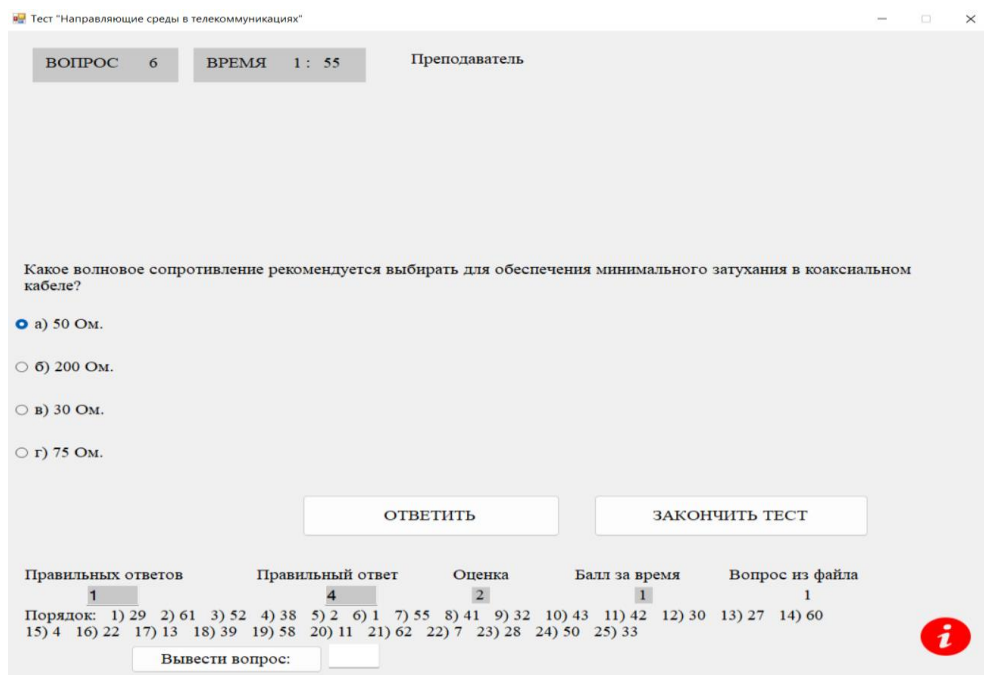


Рис. 7. Интерфейс преподавателя во время тестирования

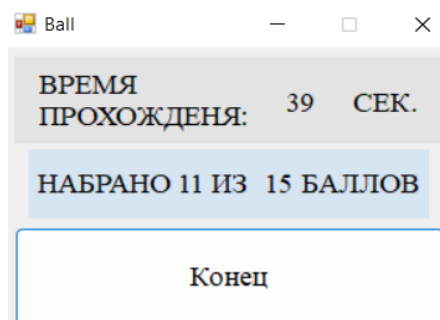


Рис. 8. Вывод результата после прохождения теста

Программа написана на языке C++ CLI, принцип действия заключается в том, что с помощью циклов создаётся динамическая матрица вопросов из файла настройки, размер которой  $(Q+1)*8$ , где  $Q$  – количество вопросов задаётся в файле настройки, +1 нужно чтобы учитывать первый блок с параметрами. В каждую ячейку матрицы заносятся данные из файла настройки, а затем выводятся в удобном для восприятия интерфейсе, в котором при

выборе ответа пользователем, ответ сравнивается с правильным, а в случае правильного выбора, количество правильных ответов, которое будет выводиться после прохождения теста увеличивается [3, 4].

### **III. Заключение**

Представленная программа позволяет студенту проверить свои знания. Узнав оценку своего знания материала, студент может быть замотивирован улучшить свои знания, чтобы укрепить их и быть более готовым к экзаменам по предмету тестирования.

Программная оболочка, разработанная в Омском государственном техническом университете на радиотехническом факультете, позволяет создавать аналогичные тестирующие программы по другим дисциплинам.

Научный руководитель: проф., д.т.н., Богачков Игорь Викторович, Омский государственный технический университет.

### **Библиографический список**

1. Пахомов Б. И. C/C++ и MS Visual C++ 2010 для начинающих. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 736 с.
2. Heege Marcus. Expert Visual C++/CLI: .NET for Visual C++ Programmers. New-York: Apress, 2007. 330 p.
3. Богачков И. В. Разработка тестирующей программы для контроля знаний студентов по волоконно-оптическим телекоммуникационным системам // Сб. тр. XII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 508–509.
4. Богачков И. В., Трухина А. И., Горлов Н. И. Совершенствование систем мониторинга волоконно-оптических линий связи // Тр. XIV-ой междунар. науч.-техн. конф. IEEE АПЭП. Новосибирск, 2018. Т. 3. С. 69–74.

*Дата поступления статьи: 16.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 27.03.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. И. Ломтев, 2023

УДК 004.896:004.732

*И. С. Лутченко*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТ IEEE 802.11**

**Аннотация.** В данной статье представлена методика построения сети беспроводной связи WLAN (Wireless local area network; что переводится как беспроводная локальная сеть) на основе стандарта IEEE 802.11. В работе также приведены характеристики данного стандарта и его отличие от других стандартов беспроводных локальных сетей, схема построения сети, а также состав оборудования.

**Ключевые слова.** IEEE 802.11, Wi-Fi (Wireless fidelity), локальные беспроводные сети.

## I. Введение

В настоящее время стремительно развиваются различные информационные технологии, а также компьютерные технологии. Отсюда существует потребность в построении развитии беспроводных соединений.

На данном этапе развития технологий, наиболее удобным и распространенным решением является организация беспроводных сетей стандарт Wi-Fi (wireless fidelity – что можно перевести как: беспроводная точность (на самом же деле смысловой нагрузки данное словосочетание не несет, это игра слов, по аналогии с термином Hi-Fi)). Стандарт широкополосной беспроводной связи Wi-Fi является непосредственно частью семейства стандарта IEEE802.11, который в 1997 году был разработан в Австралии. Эта технология, как правило, применяется для создания точек доступа, а также при создании и организации беспроводных локальных компьютерных систем:

Представим вашему вниманию следующие преимущества беспроводных сетей:

- Простота развёртывания.
- Быстрые изменения топологии сети при необходимости
- Стоит так же выделить, что беспроводная сеть не нуждается в прокладке и монтаже кабелей.

В настоящее время широко используется преимущественно ниже представленные 3 стандарта группы IEEE 802.11 - 802.11n(представлены на рис. 1)

Стандарт	802.11g	802.11a	802.11n
Частотный диапазон, ГГц	2,4-2,483	5,15-5,25	2,4 или 5,0
Метод передачи	DSSS,OFDM	DSSS,OFDM	MIMO
Скорость, Мбит/с	1-54	6-54	6-300
Совместимость	802.11 b/n	802.11 n	802.11 a/b/g
Метод модуляции	BPSK, QPSK, OFDM	BPSK, QPSK, OFDM	BPSK, 64-QAM
Дальность связи в помещении, м	20-50	10-20	50-100
Дальность связи вне помещения, м	250	150	500

Рис. 1. Сравнение стандартов IEEE802.11

Рассмотрим процесс, требующий подключения клиента к беспроводной сети, которая работает в инфраструктурном режиме. Для того чтобы подключить беспроводное устройство к беспроводной сети (подключиться к точке доступа), необходимо осуществить 4 состояния (рис. 2).

- Состояние 1: начальное состояние, не аутентифицировано, не ассоциировано.
- Состояние 2: аутентифицировано, не ассоциировано.
- Состояние 3: аутентифицировано и ассоциировано (в ожидании аутентификации RSN (Robust Security Network, переводится как надежная сеть безопасности)).
- Состояние 4: аутентифицировано и ассоциировано.



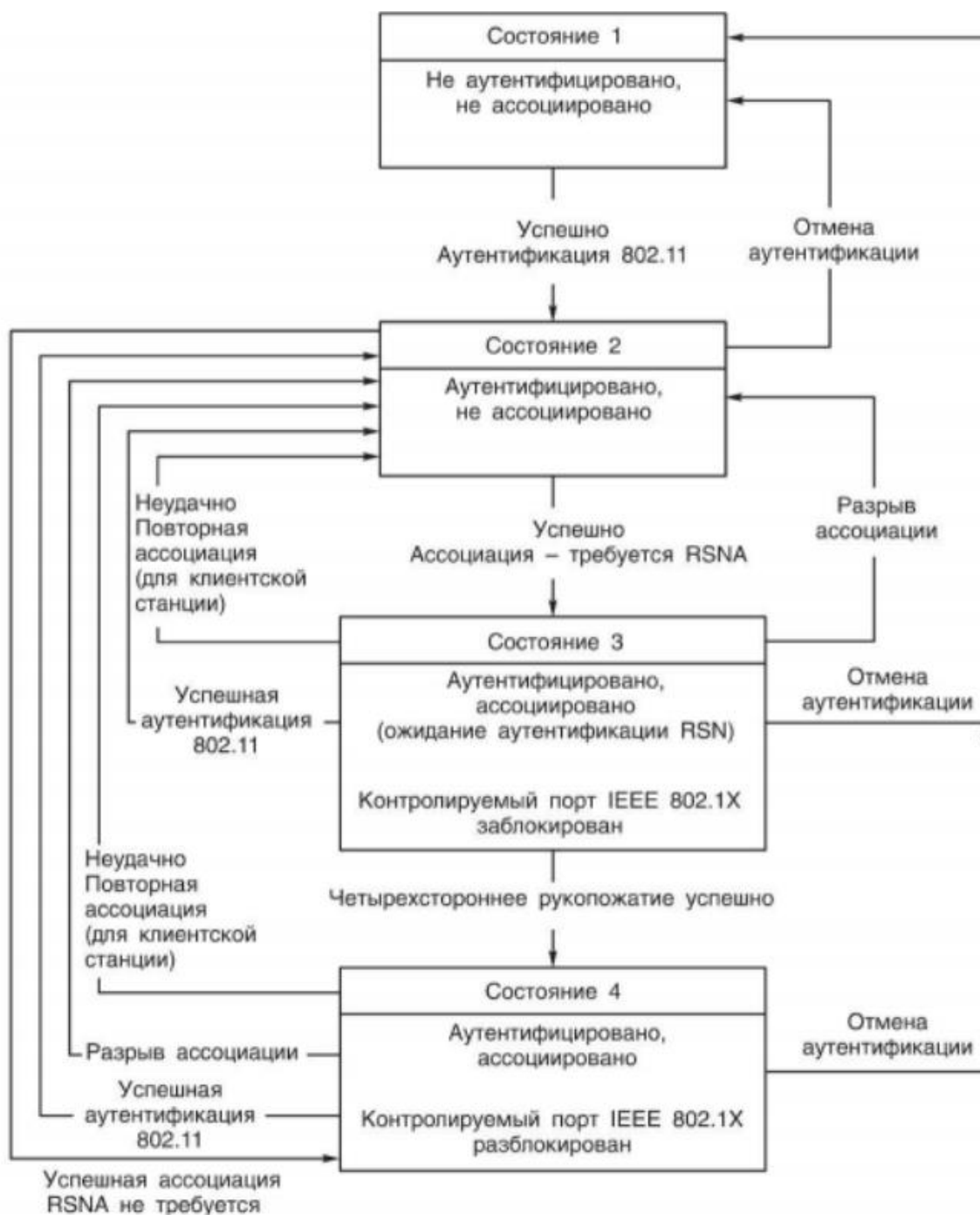


Рис. 2. Диаграмма состояний беспроводного клиента

Диаграмма состояний представлена на рис. 2. Для того чтобы выбранное устройство могло начинать передачу данных через точку доступа, оно должно быть в состоянии "аутентифицировано и подключено". Переход в это состояние выполняется устройством поэтапно путем совместного использования систем управления 802.11

## II. Расчетная часть

Далее продемонстрируем пример развертывания сети беспроводного доступа стандарта Wi-Fi в общежитии № 2 Алматинского Института Энергетики и Связи. В ходе непродолжительных расчётов получаем необходимое количество точек доступа, в нашем случае – 4.

Таблица 1

**Расчет  $R_5$  для всех видов оборудования**

	$R_5$ при веб-браузере, шт.	$R_5$ при видеоконференцсвязи, шт.	$R_5$ при использовании видео высокого разрешения, шт.	$R_5$ при передаче файлов, шт.	$R_5$ при удаленном обучении, шт.
Смартфоны	0,67	Не требуется	3,34	2,67	0,04
Ноутбуки и ПК	0,1	0,1	0,07	0,07	0,06

Далее нам необходимо произвести расчет эффективной изотропной мощности и излучаемой мощности для одной точки доступа.

Таблица 2

**Параметры точки доступа**

Обозначение	Наименование	Ед. изм.	Значение
$P_{ГРД}$	выходная мощность передатчика	дБм	20
$G_{ГРД}$	коэффициент усиления антенны	дБи	6
$W_{АФГРД}$	потери сигнала передатчика	дБ	8

Осуществим подбор оборудования:

Беспроводной коммутатор используем DWS-3160-24ТС (представлен на рис. 3), так как является полнофункциональным и при этом достаточно экономичным решением для бизнеса, а также для провайдеров услуг.



Рис. 3. Беспроводной коммутатор DWS-3160-24ТС

Точку доступа возьмем D-Link DWL-6620APS (представлена на рис. 4). Данная беспроводная точка доступа соответствует стандарту IEEE 802.11ac. На нашем российском рынке это самая современная доступная технология из имеющихся.



Рис. 4. Беспроводная точка доступа DWL-6620APS

Ниже представлен пример размещения, рассчитанных нами точек доступа, а также беспроводного коммутатора, на третьем и четвертом этажах (рис. 5).

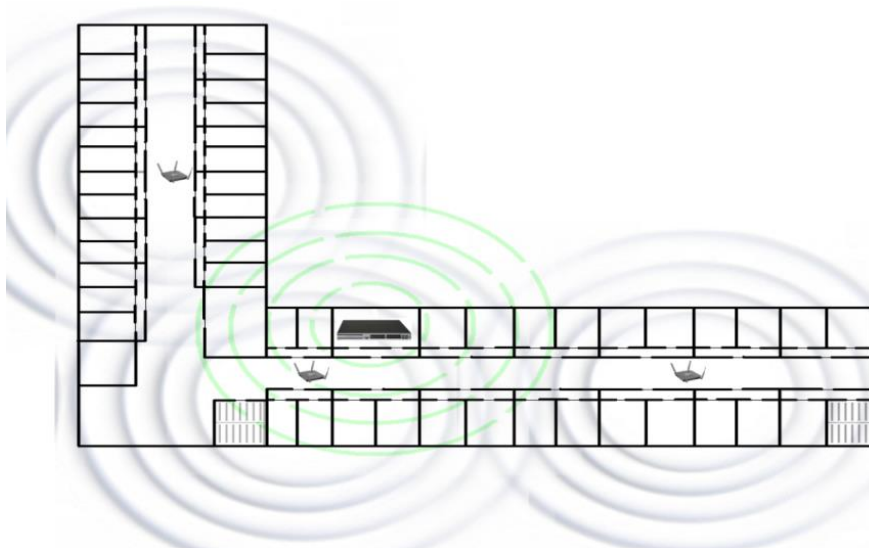


Рис. 5. Схема структурная размещения точек доступа и коммутатора

### III. Заключение

В заключение хочу отметить, что мною были проведены анализы сети беспроводного доступа Wi-Fi. В качестве выбора оборудования предпочтения были отданы аппаратуре 5-го поколения фирмы D-Link, так как были максимальные результаты в параметре цена-качество. Стоит обязательно отметить, что обоснование выбора оборудования было произведено с учетом: возможности применения, стоимости и так далее.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Лутченко Сергей Святославович, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Краткое описание стандартов Wi-Fi. URL: [www.nklondike.ru/articles.php?lng=ru&pg=324](http://www.nklondike.ru/articles.php?lng=ru&pg=324) (дата обращения: 01.04.2023.)

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 27.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© И. С. Лутченко, 2023

*Д. А. Марков*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### ОСНОВНЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE, ВЛИЯЮЩИЕ НА КЛИЕНТСКИЙ ОПЫТ

**Аннотация.** В статье рассмотрены одни из ключевых показателей, влияющие на качество мобильной связи стандарта LTE. Проведен анализ нескольких основных путей решения при повышении эффективности радиосети.

**Ключевые слова:** CQI (Channel Quality Indicator), SINR (Signal Interference + Noise Ratio), RSRP (Reference Signal Received Power); User Equipment (UE); OFDMA (Orthogonal Frequency Devision Multiple Access); Long-Term Evolution (LTE).

## I. Введение

В данной статье разберем такие качественные показатели, как CQI (Channel Quality Indicator), SINR (Signal Interference + Noise Ratio), RSRP (Reference Signal Received Power). Данные показатели помогают оценить качество услуг мобильной связи, получаемое абонентом от мобильной сети. Рассмотрим, что каждый из этих показателей означает. А также рассмотрим основные инструменты для улучшения этих показателей.

## II. Постановка задачи

CQI. Это измерения со стороны абонентского устройства UE (User Equipment) качества приёмного сигнала с базовой станции. Телефон абонента измеряет качество канала и отправляет информацию о CQI – базовой станции [3]. Используя эту информацию, БС (Базовой станции) выбирает кодово-модуляционную схему для передачи. Это необходимо, так как при плохом сигнале, при передаче, пакеты данных теряются и их требуется отправить повторно. Повторная отправка пакетов приводит к неэффективному использованию ресурсов базовой станции. Чтобы этого не происходило, каждому зарегистрированному устройству присваивается параметр CQI в зависимости от качества связи у этого устройства. CQI может принимать значения от 0 до 15. Чем выше CQI, тем выше кодово-модуляционная схема и тем выше скорость у абонента. Улучшая показатель CQI, мы увеличиваем емкость сети, за счет увеличения пользовательской скорости [3].

В таблице 1 приведены зависимости типа модуляции от значения CQI. В сетях связи стандарта LTE (Long-Term Evolution) в DL (DownLink) используется модуляция OFDM (Orthogonal Frequency Devision Multiplexing) – ортогональная частотная модуляция. Этот тип модуляции определяет и принцип доступа OFDMA (Orthogonal Frequency Devision Multiple Access) – множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов [1].

Таблица 1

**Зависимость типа модуляции от значения CQI**

CQI	Modulation (UE before 12 rel.)	Modulation (UE after 12 rel.)
1	2	3
0	QPSK	QPSK
1	QPSK	QPSK
2	QPSK	QPSK
3	QPSK	QPSK
4	QPSK	16QAM
5	QPSK	16QAM
6	QPSK	16QAM
7	16QAM	64QAM
8	16QAM	64QAM
9	16QAM	64QAM
10	64QAM	64QAM
11	64QAM	64QAM
12	64QAM	256QAM
13	64QAM	256QAM
14	64QAM	256QAM
15	64QAM	256QAM

На рис. 1 приведен график зависимости User Throughput от CQI более чем в 6 000 точках в городе Омске. User Throughput – это пользовательская скорость в DL.

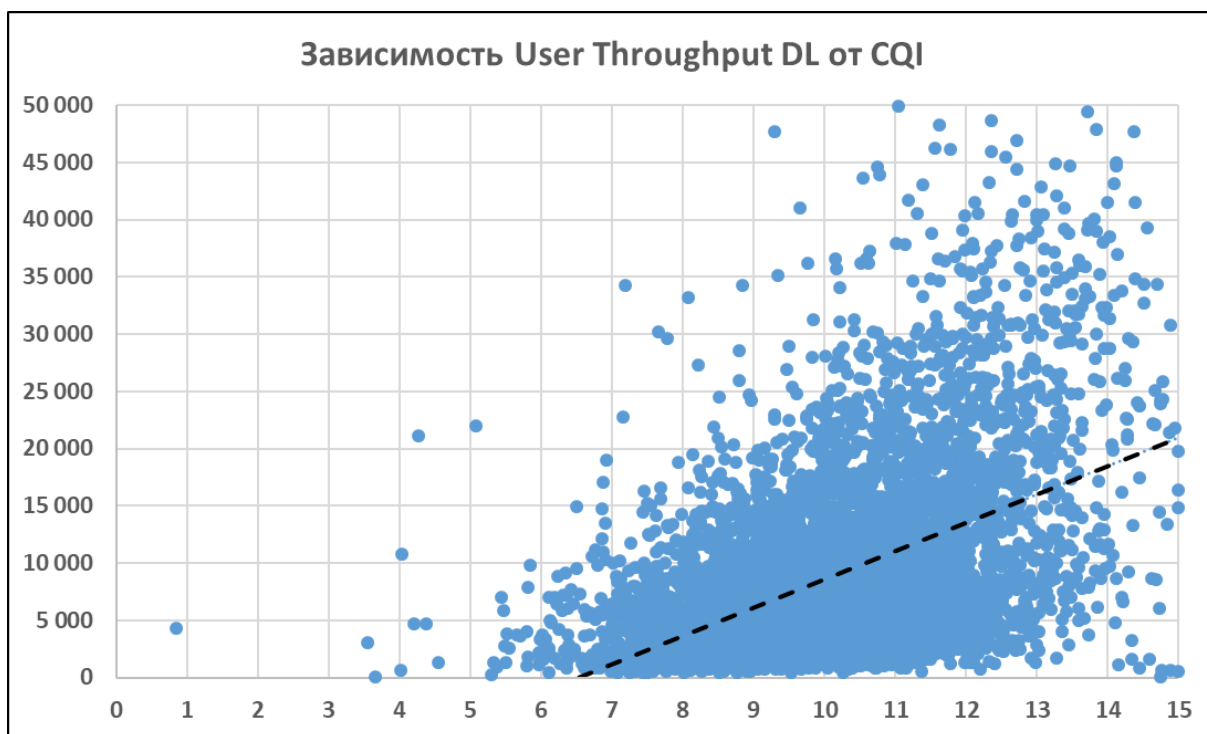


Рис. 1. Зависимость User Throughput DL от CQI

Анализируя представленный график, можно сделать вывод, что чем больше CQI, тем выше скорость и тем лучше пользовательский опыт.

**SINR.** Рассчитывается как отношение полезного сигнала к интерференции и помехам от посторонних источников и практически всегда имеет положительное значение. Он показывает уровень шума во всей полосе LTE. Чем он ниже, тем хуже будут скорости передачи данных [2]. Его ценность в том, что он показывает шум от всех сотовых станций в конкретном месте. В таких местах смартфону или модему сложнее детектировать сигнал от своей станции и ресурсы сети LTE там ограничены. Показатель SINR широко используется для оценки качества сигнала. Значение SINR измеряется в дБ (dB). SINR лучше определяет взаимосвязь между радиоусловиями и пропускной способностью [2]. UE в LTE обычно используют SINR для расчета CQI – показатель качества канала, который UE сообщают в сеть.

Таблица 2

**Описание значений SINR**

Качество	SINR( dB)
Отличное	$\geq 20$
Хорошее	От 13 до 20
Удовлетворительное	От 0 до 13
Плохое	Ниже 0

**RSRP.** Среднее значение мощности принятых пилотных сигналов в соответствии с указанной полосой пропускания или уровень принимаемого сигнала с базовой станции. Это важнейший параметр, который устройство должно измерять для процедур выбора сектора, хэндовера [2]. Диапазон от -44dBm до -140dBm. Так как измеряется только мощность

сигналов, RSRP не дает нам информации о качестве сигнала. RSRP не зависит от ширины канала и не учитывает побочные сигналы и помехи.

В таблице 3 приведено описание уровней RSRP.

Таблица 3

**Описание значений RSRP**

Качество	RSRP(dBm)
Отличное	$\geq -80$
Хорошее	От -80 до -90
Удовлетворительное	От -90 до -110
Плохое	Ниже -110

Далее на рис. 2 представлен график зависимости RSRP от пользовательской скорости более чем в 19 000 точках в городе Омск.

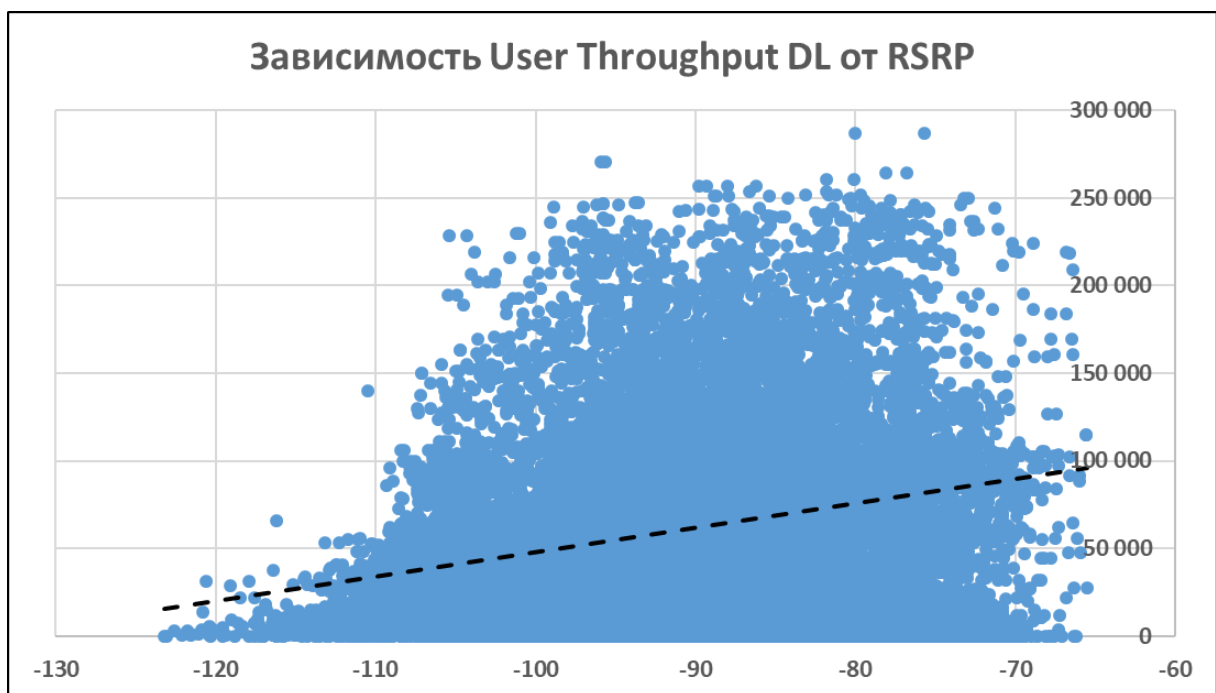


Рис. 2. График зависимости User Throughput DL от RSRP

Из рисунка становится понятно, что чем больше ( $< -110$  dBm) мы имеем RSRP, тем выше пользовательская скорость в DL и вновь лучше пользовательский опыт.

Может возникнуть вопрос, как улучшать данные показатели на сети? В случае, когда рассматриваемые показатели опускаются ниже приемлемых уровней, рекомендуется проводить анализ сети на предмет проблем согласно следующим шагам.

Первый шаг – это проверка аварий на БС, проверка исправности оборудования, АФУ (Антенно-фидерное устройство), проверка соответствия выставленных параметров на БС. Далее если аварии на БС отсутствуют, приступают ко второму шагу.

Второй шаг – это оптимизации покрытия. Под оптимизациями покрытия подразумеваются корректировки АФУ: регулировка электрического угла или механического угла наклона антенны, изменение азимута проблемного сектора, изменение подвеса антенны сектора. Конечной целью данных действий должно быть улучшение покрытия или снижение уровня паразитных сигналов в проблемной локации. Если же и корректировка

АФУ не помогла в улучшении показателей, тогда приступают к крайним мерам – третьему шагу.

Третий шаг – это увеличение ёмкости или покрытия. Примеры: расширение полосы частоты канала, добавление нового BAND’а LTE на БС, увеличение схемы использования ММО (Multiple Input Multiple Output.) А также в самую последнюю очередь, когда ни одно из предыдущих действий: оптимизация и расширение никак не помогли, производят строительство новой БС.

В таблице 4 описаны составляющие всех мероприятий по повышению эффективности сети.

Таблица 4

**Описание при проводимых мероприятиях для повышения эффективности сети**

Проводимое мероприятие	Ключевые действия данного мероприятия
Оптимизация сети	1. Корректировка азимута сектора 2. Регулирование электрического угла наклона антенны 3. Регулирование механического угла антенны 4. Изменение высоты подвеса антенны
Расширение сети	1. Увеличение ширины полосы частот, путем перевода частот из другой технологии 2. Добавление нового BAND’а LTE на БС 3. Увеличение схемы ММО
Строительство новой БС	1. Выбор максимально наилучшей позиции новой БС для того чтобы «разгрузить» проблемный сектор и правильно покрыть территорию, или улучшить покрытие необходимой области.

**III. Заключение**

Таким образом, показатели качества CQI, SINR, RSRP позволяют оценить влияние на клиентский опыт мобильной связи стандарта LTE. В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что в случаях, когда значения показателей качества радиосети становятся ниже приемлемых уровней, производят анализ сети и используют различные инструменты для улучшения рассмотренных показателей.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Копытов Евгений Юрьевич, Омский государственный технический университет.

**Библиографический список**

1. Принципы построения радиointерфейса LTE в downlink: офиц. сайт. – URL: celnet.ru (дата обращения: 01.04.2023).
2. GSM-Репитеры.РУ: сайт. – URL: gsm-repiteri.ru (дата обращения 02.04.2023).
3. Sharetechnote: сайт. – URL: <https://www.sharetechnote.com> (дата обращения 02.04.2023).

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. А. Марков, 2023

*Д. А. Медников*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **КОМБИНИРОВАННАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Аннотация.** В статье рассказывается о комбинированной линии связи специального назначения (КЛС СН), предназначенной для нужд Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) и административно-хозяйственного управления в новых регионах Российской Федерации. Обозначены цели, выполняемые задачи линии связи, принципы построения, а также приведен анализ преимуществ данной линии перед другими видами связи.

**Ключевые слова:** комбинированная линия связи, волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), радиорелейные линии связи (РРЛС), Вооруженные Силы Российской Федерации.

### **I. Введение**

Обеспечение войск связью является одним из наиболее важных аспектов ведения боевых действий. Без управления войсками, оперативного получения важной информации невозможно успешное проведение различных операций. Отсутствие связи может привести к значительным потерям как в личном составе, так и в вооружении и военной технике. Также требуется решение многочисленных задач в рамках восстановления народного хозяйства новых регионов.

В современных условиях необходимо использовать современные комплексы связи, которые обеспечивают оперативный обмен информацией со скоростями, сравнимыми с обменом информацией в сети Интернет, и которые невозможно «подавить» комплексами радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Основными требованиями, предъявляемыми к управлению, являются: устойчивость, непрерывность, оперативность, скрытность.

Устойчивость и непрерывность следует рассматривать как единое целое, условиями для достижения которых являются: своевременное принятие решение при организации боя и в ходе его ведения; наличие постоянно действующей связи; постоянная готовность подчиненных частей.

Оперативность заключается в быстроте проведения всех мероприятий при подготовке и ведении боя, в способности адаптироваться к изменяющейся обстановке на театре военных действий.

Скрытность достигается сохранением в тайне всех проводимых мероприятий, а также сохранением в тайне места дислокации пунктов управления, узлов и линий связи [1].

24 февраля 2022 года решением президента Российской Федерации (РФ) Владимира Путина была начата Специальная Военная Операция (СВО) по защите Донецкой и Луганской Народных Республик (ДНР и ЛНР). По итогам Референдумов 27 сентября 2022 года данные республики вошли в состав РФ совместно с Запорожской и Херсонской областями.

Для успешного решения задач Министерства Обороны (МО) и других Федеральных органов исполнительной власти (ФОИВ) предлагается использовать Комбинированную линию связи специального назначения (КЛС СН), которая свяжет между собой центры новых регионов России.

### **II. Постановка задачи**

Данная КЛС СН должна связать областные центры новых регионов Российской Федерации для обеспечения оперативного обмена информацией.



Оконечные населенные пункты линии: Севастополь – Луганск.

Скорость передачи: по синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) скорость передачи информации должна быть до STM-1 (155 Мбит/с).

Для проектирования линии следует провести анализ физико-географических условий (ФГУ) местности.

### III. Цели и задачи комбинированной линии связи специального назначения

Комбинированная линия связи специального назначения предназначена для передачи тактической и оперативной разведывательной информации, информации об оперативной обстановке на линии соприкосновения со всех участков фронта в интересах штабов областных центров и вышестоящему командованию Военного округа (ВО); доведения приказов вышестоящего органа до подчиненных частей; обеспечение взаимодействия всех видов и родов войск, Военно-Морского Флота (ВМФ) и других ФОИВ.

Выполняемые задачи:

- Прием и передача информации между штабами, передача информации вышестоящему командованию.
- Передача приказов вышестоящего командования до штабов с последующей передачей информации до подчиненных частей (подразделений).
- Оперативный обмен информацией между видами и родами войск, ВМФ, ФОИВ и обеспечение их взаимодействия.
- Обеспечение своевременного обмена информацией в соответствии с категорией срочности.

КЛС СН является стратегической линией связи, основной задачей которой является обеспечение управления подразделениями от пунктов управления Генерального Штаба Вооруженных Сил Российской Федерации (ГШ ВС РФ) и поддержание их взаимодействия [2].

### IV. Проектирование линии

С использованием электронного ресурса «Google Maps» построена схема, на которой будет строиться КЛС СН. Для упрощения построения и, в дальнейшем, обслуживания линия связи будет прокладываться вдоль автомобильных магистралей.

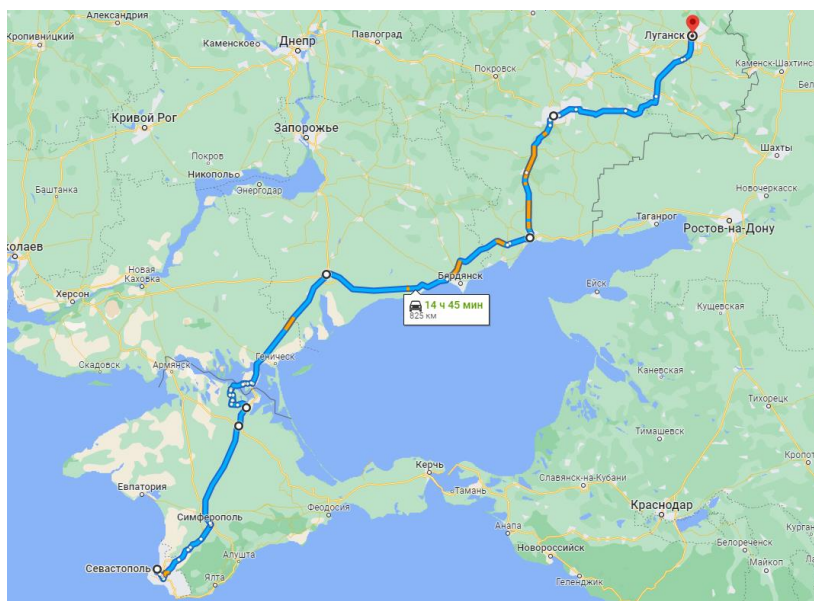


Рис. 1. Проект комбинированной линии связи специального назначения

Протяженность линии связи 825 км. Населенные пункты, охватываемые линией: Севастополь, Симферополь, Джанкой, Мелитополь, Мариуполь, Донецк, Луганск.

Так как расстояние между конечными пунктами достаточно велико, а также требуется скрытная и устойчивая связь для исключения возможности подавления средствами РЭБ, то при проектировании данной линии следует применять кабельные линии связи. Для обеспечения поставленной задачи целесообразно применять волоконно-оптические линии связи, так как оптическое волокно обладает меньшими затуханиями в сравнении с другими проводными линиями, также обеспечивается скрытность передачи информации с высокой скоростью обмена, которая может составлять Гбит/с.

Вдоль магистралей, вдоль которых проектируется линия, расположены малые населенные пункты, в которых возможно установить пункты регенерации сигнала в ВОЛС, а также линии электропередач (ЛЭП), которые смогут обеспечить электропитание линии.

## V. Анализ физико-географических условий

При проектировании линии связи следует учитывать различные условия местности, такие как рельеф, грунт. На рис. 2 показан рельеф участка, на котором проектируется линия связи.

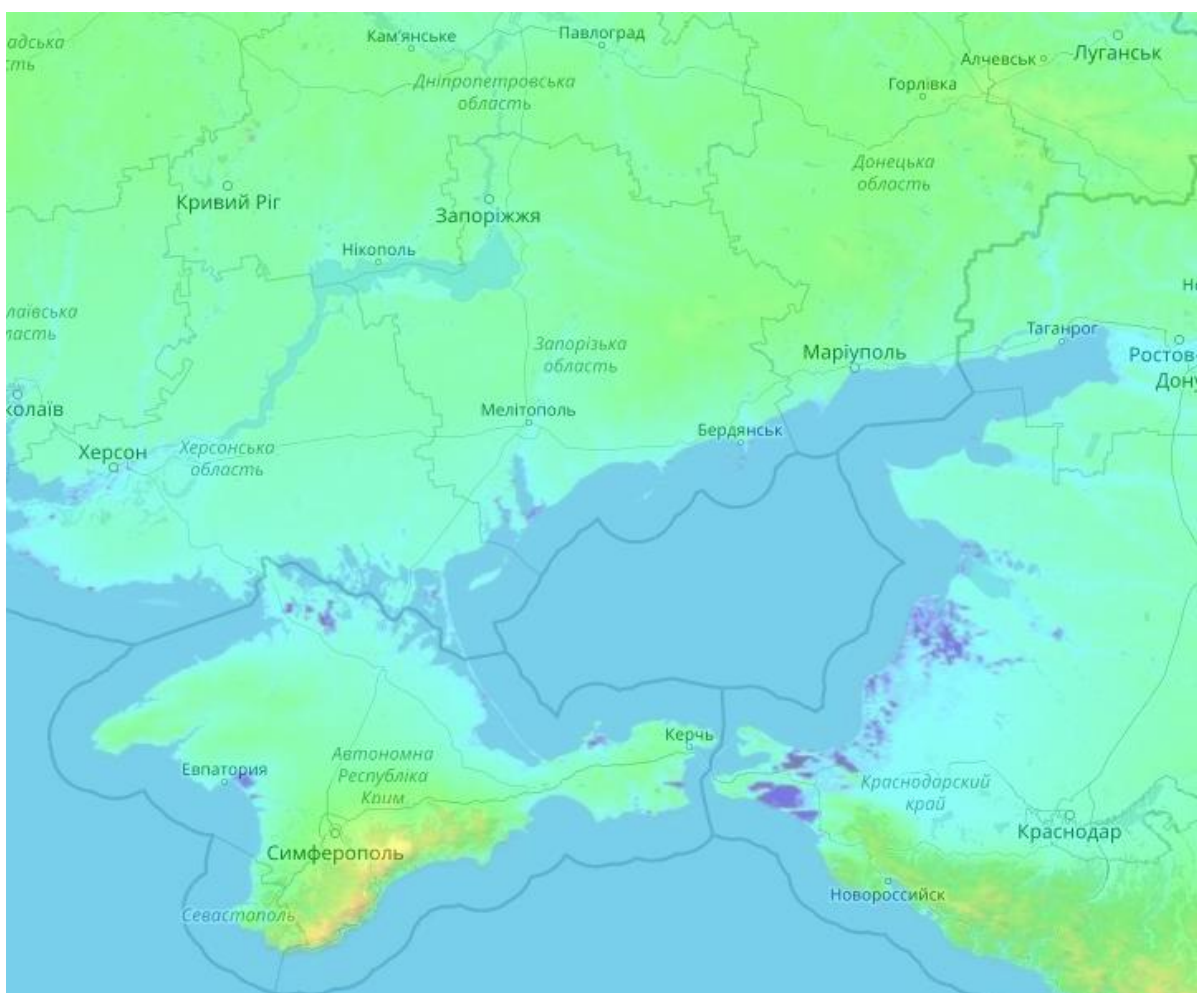


Рис. 2. Топографическая карта участка проектируемой линии

Как видно из карты, местность равнинная, без больших перепадов высот, за исключением Крымского полуострова. Изменения высот ландшафта от 30 до 150 метров. На



Крымском полуострове, начиная от Симферополя, начинается горная местность, перепады высоты могут достигать 500 метров.

Так как для обеспечения скрытности передачи информации ВОЛС будет проглаживаться в грунте, то следует учитывать состав почв и категорию сложности разработки. Почвенная карта участка проектируемой линии представлена на рис. 3 [3].

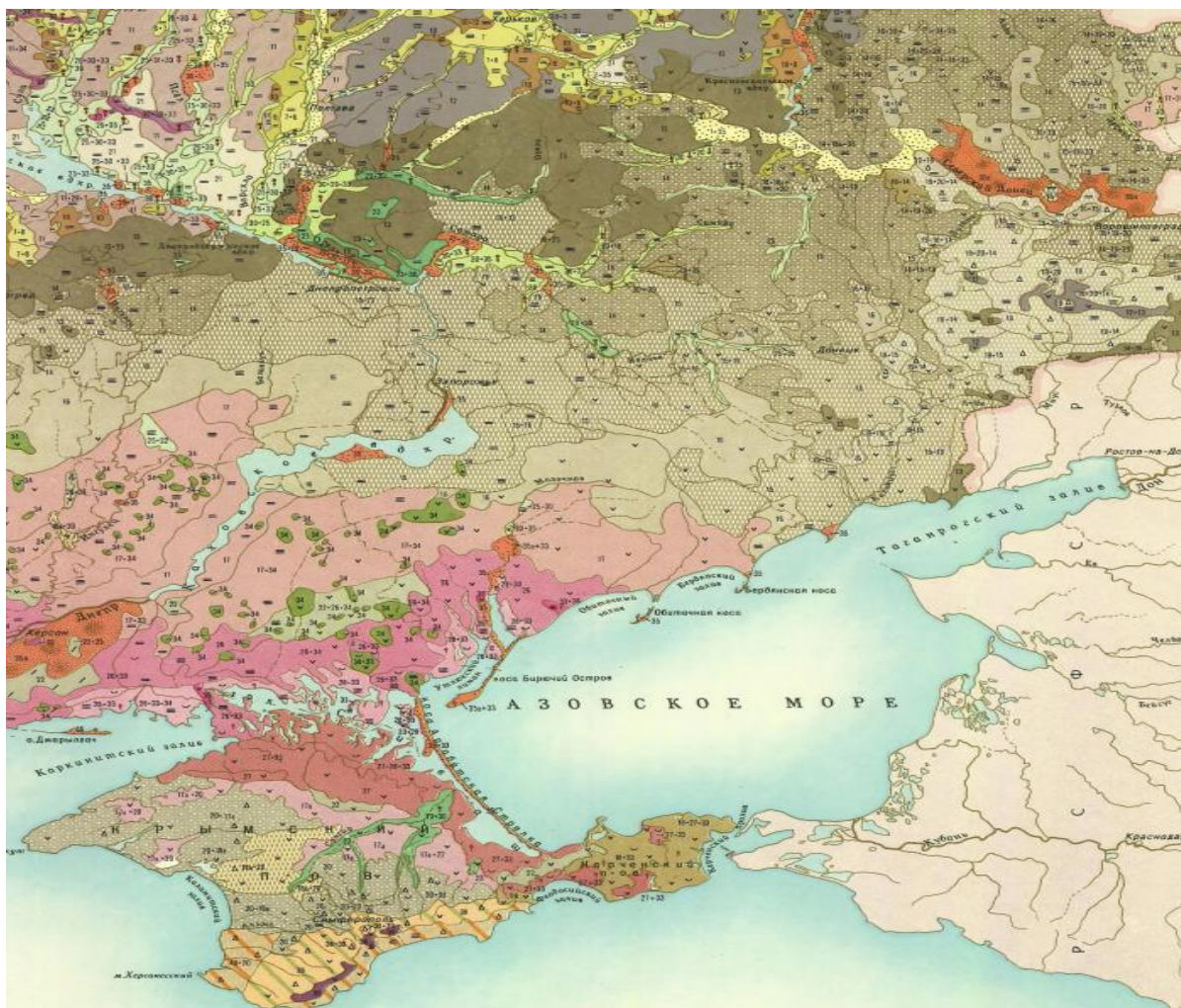


Рис. 3. Карта почв региона

По карте почв составлена сводная таблица категории сложности разработки почв в соответствии со СНиП IV-2-82 [4].

Таблица 1

**Категории сложности разработки почв регионов**

Субъект	Категория сложности
Луганская Народная Республика	1–2
Донецкая Народная Республика	1–2
Запорожская область	1–2
Херсонская область	1
Республика Крым	1–5

Как следует из анализа, на большей части длины КЛС СН возможно проложить линию в грунте, однако от Симферополя до Севастополя начинается горная местность с большими перепадами высот и достаточно твердым грунтом. Исходя из этого, на данном

участке следует применять радиорелейные станции, так как они просты в развертывании и также обеспечивают быстрый обмен информацией до 155 Мбит/с, что удовлетворяет поставленной задаче по скорости передачи.

Следует учесть еще один фактор, что на участке Чонгар – Ермаково стоит водная преграда, ширина которой более 10 км. Если на этом участке поставить РРЛС, то это может дать выигрыш в расстоянии 43 км, следовательно, длина всей линии сокращается с 825 км до 782 км, что за собой влечет меньшие экономические затраты, а также экономию времени построения линии, так как радиорелейные линии связи достаточно быстро разворачиваются на местности.

## **VI. Заключение**

В данной статье представлено решение на проектирование комбинированной–линии связи специального назначения, спроектированная для нужд ВС РФ, ФОИВ и административно-хозяйственной деятельности.

Данная линия обеспечит выполнение требований к управлению и связи, обеспечит оперативный обмен информацией, а также взаимодействие сил и средств Министерства обороны и других ФОИВ.

Из анализа ФГУ региона следует, что КЛС СН должна включать в себя волоконно-оптические и радиорелейные линии связи. Длины участков проектируемой комбинированной линии:

- Луганск – Чонгар – ВОЛС, длина участка 584 км.
- Чонгар – Ермаково – РРЛ, длина участка 10 км.
- Ермаково – Бахчисарай – ВОЛС, длина участка 146 км.
- Бахчисарай – Севастополь – РРЛ, длина участка 28 км.

Так как предлагаемая КЛС СН состоит из ВОЛС, скорость передачи по которым может достигать десятки Гбит/с, а также участков РРЛС со скоростью передачи до 155 Мбит/с, то поставленная задача по скорости передачи является выполнимой.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Коровин Сергей Дмитриевич, Омский государственный технический университет.

## **Библиографический список**

1. Задачи связи и требования, предъявляемые к ней по управлению войсками Студопедия. - URL: <https://studopedia.ru> (дата обращения: 10.03.2023).
2. Костарев С. В., Воробьев И. Г. Практические выводы из опыта организации и обеспечения связи в международных вооруженных конфликтах // Военная мысль. 2022. №1. С. 86–93.
3. Почвенная карта УССР: Это место - URL: <http://www.etomesto.ru> (дата обращения: 10.03.2023).
4. Правила разработки и применения элементных сметных норм на строительные конструкции и работы: СНиП IV-2-82// утв. Государственным комитетом СССР по делам строительства 17.03.1982: введ в действие с 01.01.1984. М: Строинздат, 1984.146 с.

*Дата поступления статьи: 23.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 27.03.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. А. Медников, 2023

## АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА АУДИОСИГНАЛА И РЕЧИ

**Аннотация.** В статье рассматриваются и сравниваются современные алгоритмы автоматического анализа качества аудиосигнала и речи. Оцениваются достоинства и недостатки алгоритмов, дается информация о структуре этих алгоритмов.

**Ключевые слова:** PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Assessment), PEMO-Q (Perceptual Model-Quality), PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality), Speech Quality, PSM (Perceptual Similarity Metric), MOS-LQO (Mean Opinion Score-Listening Quality Objective), MISHRA (Multiple Stimuli with Hidden Reference and Anchor), МСЭ (Международный союз электросвязи).

### 1. Введение

В современном мире голосовые коммуникации играют огромную роль в жизни человека. Люди используют телефоны, видеоконференции и голосовые сервисы для связи по всему миру. Однако, чтобы обеспечить высокое качество речи в приложениях, необходимо использовать специальные алгоритмы измерения качества речи.

Данная статья направлена на то, чтобы определить оптимальные способы оценки качества речевого сообщения при использовании современных низкоскоростных алгоритмов сжатия речевых сигналов [1–2].

### II. Принцип работы алгоритмов анализа качества аудиосигнала

На сегодняшний день имеются специальные алгоритмы для оценки качества звука в речевых коммуникациях, которые используются такими крупными компаниями как SwissQual, OPTICOM, TNO [3], в том числе в сфере анализа качества речи операторов мобильной связи. Метрики качества речи являются важными инструментами для оценки производительности систем голосовой связи, включая телефонию, видеоконференции и услуги голоса (VOIP – Voice over IP) [4–5]. Среди наиболее широко используемых показателей качества речи – PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality), POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Assessment), VISQOL (Visual Speech Quality Objective Listening), PEMO-Q (Perceptual Model-Quality), fwSSNR (Frequency-Weighted Segmental SNR).

Имеются также модернизации уже существующих алгоритмов для конкретных нужд, связанных, например, с исследовательской деятельностью.

Каждый из методов анализа качества аудиосообщения должен придерживаться определенных стандартов и критериев оценки, например, MOS-LQO (Mean Opinion Score-Listening Quality Objective) [5] или MISHRA (Multiple Stimuli with Hidden Reference and Anchor) [6] по данным международного союза электросвязи МСЭ-T/ITU-T.

Процесс использования каждого из алгоритмов выглядит следующим образом:

- Загрузка записи речевого сигнала в программное обеспечение для анализа качества речи.
- Настройка параметров анализа, таких как тип кодека, битрейт и другие.
- Запуск анализа качества речи с помощью методики.
- Получение результатов анализа, которые могут включать в себя значения MOS, которые отражают воспринимаемое качество речи.

На рис. 1. продемонстрирован принцип работы алгоритмов «сравнения». Суть заключается в первичном получении двух сигналов, их обработке с потерями, что включает в себя интерференцию, различные шумы, а также, дальнейшем выравнивании с учетом задержки, если таковая необходимость имеется [7–9]. Далее используется модель слуховой системы человека, которая состоит из ряда радиоэлементов (полуволновый выпрямитель, фильтр нижних частот, модуляцию нижних частот и т.д.), позволяющих за счет преобразований сигнала более точно оценить качество восприятия. Показатель PSM (Perceptual Similarity Metric) представляет собой общее воспринимаемое качество звука, а PSMt – мгновенное объективное качество звука, которое вычисляется путем взаимного «слияния», корреляции. Последующие этапы отвечают за получения метрик сходства, на основании которых будет произведен вывод о качестве звука/речи [10–11].

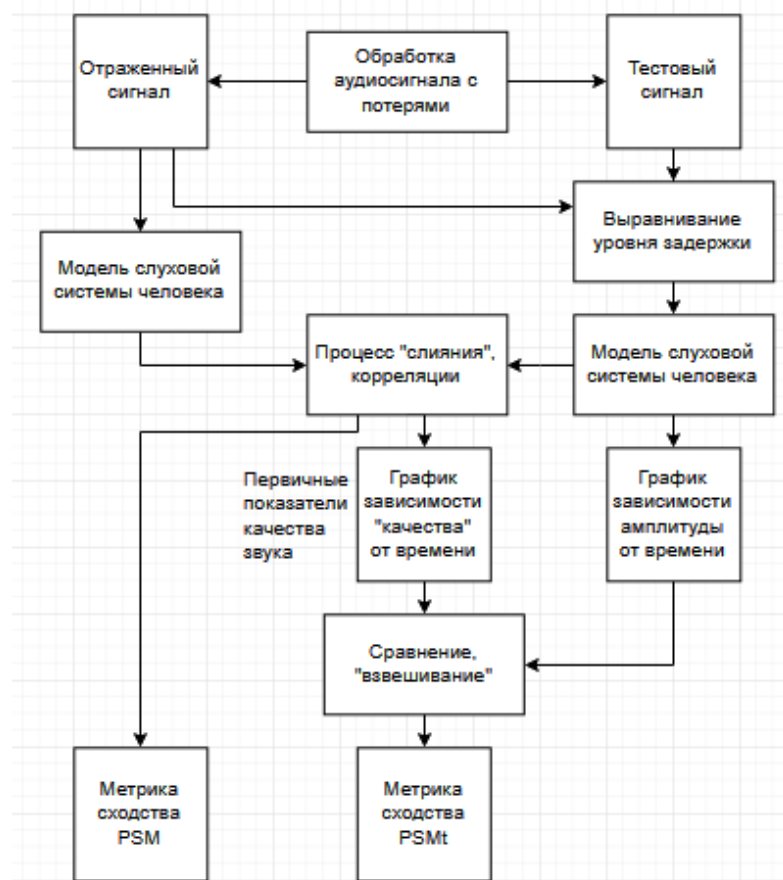


Рис. 1. Образец работы объективных алгоритмов принципа «сравнение»

### III. Перцептивная модель качества PEMO-Q

PEMO-Q (Perceptual Model-Quality) [7] является перцептивной моделью качества, которая оценивает данного искаженного сигнала по отношению к соответствующему опорному сигналу высокого качества (рис.1). Аудиальная модель используется для вычисления так называемых внутренних репрезентаций. Эти внутренние представления проецируются в виде метрики сходства PSM [11].

Данный алгоритм эффективен при обнаружении искажений, вызванных различными типами обработки звука, такими как сжатие, выравнивание и шумоподавление.

Из плюсов PEMO-Q способен является то, что с ним возможно работать в широкой полосе частот, что делает данный метод более гибким, является достаточно нетребовательным в ключе ресурсов оборудования. Недостатком же использования является

низкая корреляция с субъективными оценками качества речи по сравнению с другими алгоритмами.

Оценка качества аудиосигнала производится по шкале в 100 баллов.

#### **IV. Перцептивная оценка качества речи PESQ**

Перцептивная оценка качества речи PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) активно применяется в области проверки качества звука по следующим параметрам: резкость звука, объем звучания, фоновый шум, задержка в аудиоканале, помехи, искажения [12].

Методика была разработана изначально для передачи речи по телекоммуникационным сетям и речевым кодекам. Поскольку PESQ использует модель слуховой системы человека для измерения сходства между эталонным и ухудшенным речевым сигналом (рис.1), то в специфике проверки, например, качества мобильной связи тестирование происходит посредством сравнения исходного файла (на стороне «говорящего») и итогового аудиосигнала (на стороне «слушателя»), что позволяет получить достоверные данные.

PESQ работает в диапазоне частот от 300 Гц до 3,4 кГц, имеет высокую корреляцию с субъективными оценками качества аудиосигнала. Из недостатков PESQ отмечена высокая производительность к ресурсам оборудования, что может осложнить работу [13].

Отличие хорошего звука от плохого производится по специальной системе «оценочных баллов» PESQ от 1 до 5.

#### **V. Метод перцептивной оценки качества звука PEAQ**

Метод перцептивной оценки качества звука PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality), подобно PESQ и PEMO-Q основан на психоакустической модели, с последующим объединением нескольких выходных переменных модели в единую метрику. PEAQ учитывает такие факторы, как частотная характеристика, временная маскировка и спектральная маскировка [9].

Основной целью PEAQ является прогнозирование субъективных оценок качества аудиосигнала, закодированного с низкой скоростью передачи данных, следовательно, характеризует воспринимаемое качество звука, как это делали бы испытуемые в тесте на прослушивание в соответствии с ITU BS.1116 [5].

PEAQ имеет примерно такой же рабочий диапазон частот, что и PESQ, аналогично высокую корреляцию с субъективными оценками качества речи, а также, менее затратен в ключе ресурсов оборудования, нежели PESQ. Несмотря на все достоинства, PEAQ периодически подвергается критике за недостаточную надежность и точность измерения качества сигналов со сложным спектральным составом.

Результаты PEAQ в основном моделируют средние оценки мнений по шкале от 1 (плохо) до 5 (отлично) [13].

#### **VI. Перцептивная объективная оценка качества прослушивания POLQA**

POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Assessment) – воспринимаемый объективный анализ качества прослушивания, является стандартизированным методом измерения качества речевых сигналов [3].

POLQA основан на модели слуховой системы человека и использует объективные меры для оценки воспринимаемого качества речи, широко используется в телекоммуникационной отрасли для оценки эффективности систем голосовой связи, учитывает такие факторы как потеря пакетов, джиттер, сбои в сети и т.д. Например, если результаты анализа показывают низкий MOS, то это может указывать на проблемы с



кодеком или на недостаточно высокий битрейт. POLQA является своего рода обновлением PESQ, предназначен для прогнозирования предполагаемого качества аудиосигнала [13].

Данный алгоритм способен работать в узкополосном и сверхширокополосном режимах, что делает его еще более гибким, нежели PEMO-Q или PESQ. Аналогично PESQ, анализ качества речи POLQA имеет высокие требования к оборудованию, но при этом, стабильные показатели работы и точности измерений.

## VII. Выбор алгоритма анализа качества речи

На основании исследований [8, 11] и всего вышесказанного выяснено, что для использования в части исследования синтеза речи при высокой степени сжатия сигнала [1-2] в рамках заданных условий наиболее подходящими являются PESQ, PEMO-Q и POLQA. Также, исходя из ряда исследований [8, 11, 14], было продемонстрировано, что, для, например, кодирования звука лучше всего себя показывают PESQ, POLQA, PEMO-Q, имея, при этом, наибольшую корреляцию с субъективными оценками за счет элемента «прогнозирования». С учетом факторов зашумленности и «забитого» аудиофона хуже себя показывали PEAQ, SIR (Speech Intelligibility Rating), dLLR (Log-Likelihood Ratio Distance), ViSQOLAudio.

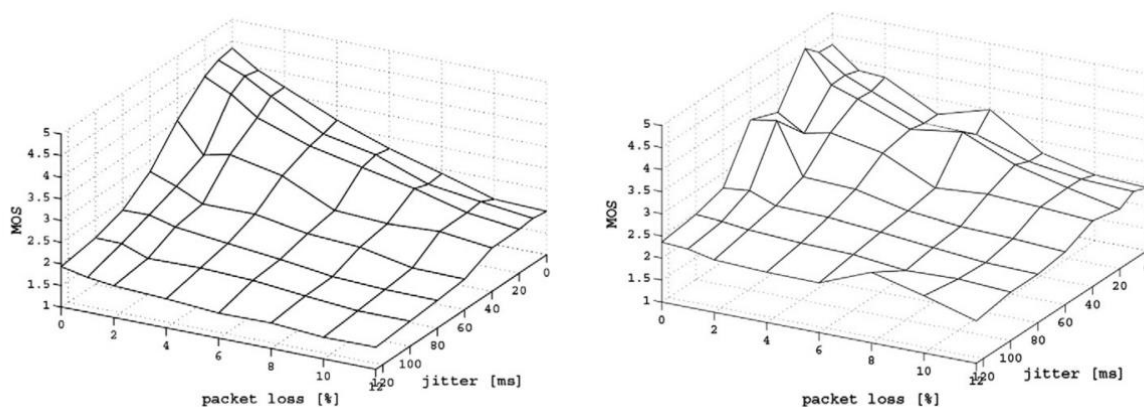


Рис. 2. Сравнение чувствительности PESQ (слева) и POLQA (справа)

Исходя из факторов, что в критериях стабильности, точности и качества наиболее подходящими являются PESQ, POLQA, PEMO-Q, необходимо также отметить их достоинства и недостатки. В выигрыше оказывается именно POLQA из-за новизны, перманентной модернизации со стороны создателей, стабильной работы, высокой корреляции к субъективной оценке. На рис.2 [15] продемонстрировано также, что POLQA более чувствительна к ошибкам выравнивания по времени и задержке.

## VIII. Заключение

В данной статье проведен анализ существующих решений по исследованию качества аудиосигналов. Для анализа проведен обзор актуальной литературы и справочников, а также, материалов и предложений от создателей алгоритмов.

Выяснилось, что наиболее оптимальным для целей высокого сжатия речи и использования вокодера является как минимум три алгоритма: POLQA, PESQ, PEMO-Q. В данном случае выбор отдан непосредственно POLQA в силу актуальности данного алгоритма, новизны за счет модернизации предыдущих поколений аналогичных методик, его технических параметров и стабильности работы.



Научный руководитель: доц., к.т.н., Корнеев Дмитрий Алексеевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. B. S. Atal, Hanauer S. L. Speech analysis and synthesis by linear prediction of the speech wave // The journal of the acoustical society of America. 1971. vol. 50, no. 2B. pp. 637–655.
2. Jmvalin.ca. A Real-Time Wideband Neural Vocoder at 1.6 kb/s Using LPCNet // xiph.org URL: [https://jmvalin.ca/demo/lpcnet\\_codec/](https://jmvalin.ca/demo/lpcnet_codec/) (дата обращения: 11.12.2022).
3. Polqa. The next generation mobile voice quality testing standard. // URL: <http://www.polqa.info/> (дата обращения: 04.03.2023).
4. Rix A. W., Beerends J. G., Hollier M. P., Hekstra A. P. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) – A new method for speech quality assessment of telephone networks and codecs // PsyTechnics. 2001. Vol.2. P. 749-752.
5. Dmtel. Оценка качества речи в сетях мобильной связи. // URL: <https://www.dmtel.ru/181120/> (дата обращения: 05.03.2023).
6. Schinkel-Bielefeld N. Audio Quality Evaluation in MUSHRA Tests–Influences between Loop Setting and a Listeners' Ratings // 142nd Convention of the Audio Engineering Society, May 11, 2017.
7. Huber R., Kollmeier B. PEMO-Q—A new method for objective audio quality assessment using a model of auditory perception. // IEEE Trans. Audio Speech Language Proc. 14, 6, November 2006, 1902. P. 1911.
8. Václav Mach. Inpainting of missing audio signal samples. Doctoral thesis. BRNO University of technology, 2016. P. 126.
9. M. Hansen, B. Kollmeier. Objective modelling of speech quality with a psychoacoustically validated auditory model. // Journal of the Audio Engineering Society (JAES), May. 14, 2000. Wilhelmshaven. Vol. 48, P. 395–409.
10. T. Dau, B. Kollmeier, A. Kohlrausch. Modeling auditory processing of amplitude modulation. i. detection and masking with narrow-band carriers. // Journal of the Acoustical Society of America (JASA), Nov 1997. Eindhoven. Vol. 102, no. 5 Pt 1, P. 2892–2905.
11. T. Rohdenburg. Development and Objective Perceptual Quality Assessment of Monaural and Binaural Noise Reduction Schemes for Hearing Aids. Thesis. Carl von Ossietzky University of Oldenburg, May 1997. P. 107.
12. Spearline. Understanding PESQ. Written by Josh O’Farrell. // URL: <https://www.spearline.com/blog/understanding-pesq/> (дата обращения: 14.03.2023).
13. Oralesystems. Bring the power of POLQA PESQ and PEAQ to your quality optimization process. URL: <https://www.opalesystems.com/blog/2/bring-the-power-of-polqa-pesq-and-peaq-to-your-quality-optimization-process-64> (дата обращения: 15.03.2023).
14. K. A. Reddy, E. Beyrami, J. Pool, R. Cutler, S. Srinivasan, J. Gehrke. A scalable noisy speech dataset and online subjective test framework // Interspeech, Sept. 15-19, 2019. Ausria. P. 1816-1820.
15. Operata. POLQA VS PESQ. Objective quality scoring explained. // URL: <https://operata.com/blog/polqa-vs-pesq> (дата обращения: 20.03.2023).

*Дата поступления статьи: 26.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 03.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. И. Минеева, 2023

Д. М. Мочалов, Д. В. Клюкин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск, Россия

## ОБ УСКОРЕНИИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА АНТЕНН МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

**Аннотация.** Рассмотрена возможность ускорения вычисления входного импеданса антенн методом моментов с помощью барицентрического деления треугольников. Выполнено тестирование, показавшее возможность ускорения при незначительной потере точности моделирования.

**Ключевые слова:** барицентрическое деление, метод моментов, антенна, функция Грина.

### I. Введение

Разработка антенн из-за увеличения спроса на устройства коммуникации становится все более важной задачей. При моделировании антенн основной проблемой является контроль их параметров и характеристик. Однако решение данной проблемы практически невозможно без применения передовых систем автоматизированного проектирования (САПР), основанных на численных методах. Среди таких методов широкое распространение получил метод моментов (МоМ) [1–4]. Согласно методу, проводящие поверхности проектируемой антенны заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами, после чего решается задача возбуждения электромагнитного поля этими токами для заданных граничных условий. Для аппроксимации криволинейных границ поверхностей геометрической модели антенны часто используется их представление в виде треугольной полигональной сетки, а для описания тока в ячейках сетки – базисные функции RWG. Каждая RWG-функция  $n$  ассоциируется с общим внутренним ребром длиной  $l_n$  двух треугольников  $T_n^+$  и  $T_n^-$  и равна нулю за их пределами [5]. Положение точки на поверхности треугольника определяется через радиус-вектор  $r_n$  относительно начала координат или радиус-вектор  $\rho_n$  относительно вершины, противоположащей общему ребру  $n$ . При этом принято, что вектор  $\rho_n^+$  направлен от вершины треугольника  $T_n^+$ , а  $\rho_n^-$  – к вершине  $T_n^-$ . Кроме того, ток вытекает из треугольника  $T_n^+$  и втекает в  $T_n^-$ , что обеспечивает выполнение закона Кирхгофа. В общем виде  $n$ -я базисная функция  $f_n(r)$  определяется как [5].

$$f_n(r) = \begin{cases} (l_n/2A_n^+) \rho_n^+(r), & r \in T_n^+; \\ (l_n/2A_n^-) \rho_n^-(r), & r \in T_n^-; \\ 0, & r \notin T_n^\pm, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_n^+$  и  $A_n^-$  – площади треугольников  $T_n^+$  и  $T_n^-$  соответственно. При этом общее ребро двух треугольников соответствует малому электрическому диполю. Вычисление плотности распределения токов  $I$  на поверхности модели выполняется путем сведения задачи к решению системы линейных алгебраических уравнений вида  $ZI = V$  с матрицей порядка  $N$  и заданным вектором воздействия  $V$ .

### II. Постановка задачи

Матрица  $Z$  описывает взаимодействие между различными элементарными диполями. Если ребра  $m$  и  $n$  рассматриваются как небольшие электрические диполи, то матричный элемент  $z_{mn}$  описывает вклад диполя  $n$  (через излучаемое поле) в электрический ток диполя  $m$

и наоборот. Это взаимодействие описывается через интегрирование функции Грина по треугольникам источников  $T_n^\pm$  с точками наблюдения в центрах треугольников  $T_m^\pm$  [3]:

$$\int_{T_n^\pm} g(\mathbf{r}) dS = \int_{T_n^\pm} \frac{\exp(-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dS, \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}$  – точка наблюдения,  $\mathbf{r}'$  – точка источника,  $k$  – волновое число,  $S$  – поверхность антенны.

Однако при вычислении диагональных элементов ( $m = n$ ) матрицы  $Z$  возникает сингулярность, поскольку  $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| = 0$ . Разработано много подходов к решению данной проблемы [6], наиболее распространенным из которых является использование барицентрического деления первичного треугольника на 9 подтреугольников [7]. Так, сначала каждое ребро первичного треугольника делится на 3, затем найденные точки соединяются с точками на противоположных ребрах (рис. 1а). В результате (2) преобразуется к виду:

$$\int_{T_n^\pm} g(\mathbf{r}) dS = \frac{S_n}{9} \sum_{k=1}^9 g(\mathbf{r}_k^c), \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_k^c$  – центры подтреугольников, а  $S_n$  – площадь первичного треугольника.

Однако этот подход требует значительных вычислительных затрат, поэтому в данной работе рассмотрена возможность деления на 4 подтреугольника (рис. 1б) для ускорения моделирования. Цель работы – оценить эффективность барицентрического деления на 4 подтреугольника при вычислении входного импеданса антенн методом моментов.

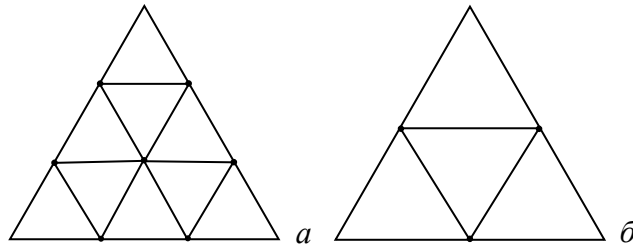


Рис. 1. Барицентрическое деление первичного треугольника на 9 (а) и 4 (б) подтреугольников

### III. Вычислительный эксперимент

За основу взята программная реализации для анализа параметров и характеристик антенн с помощью метода моментов из [7] и переработана функция барицентрического деления первичного треугольника. При реализации данного подхода использовалось деление каждого ребра первичного треугольника на две части. Далее, найденные точки центров ребер соединялись между собой. Однако при делении на 4 подтреугольника центр первичного треугольника совпадает с центром одного из подтреугольников, поэтому при расчете диагональных элементов матрицы  $Z$  использовалось деление на 9 подтреугольников.

Тестирование проводилось на основе модели бесконечно тонкого диполя со следующими параметрами: ширина  $w = 0,05$  м; длина  $l = 2$  м; ширина зазора  $h = 0,025$  м (рис. 2). Моделирование проводилось на частотах 75, 150 и 225 МГц при шаге дискретизации  $\lambda/8$  (рис. 3а) и  $\lambda/10$  (рис. 3б). Полученные результаты сравнивались с рассчитанными на основе подхода из [7]. В таблицу 1 сведены результаты вычисления входного импеданса по предложенному подходу (подход I) и из [7] (подход II), а также отклонения (%) расчетных значений между собой.

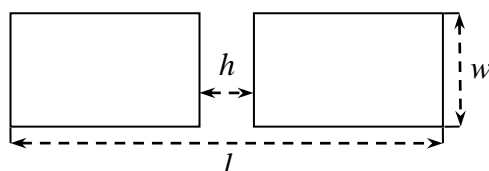


Рис. 2. Модель бесконечно тонкого диполя

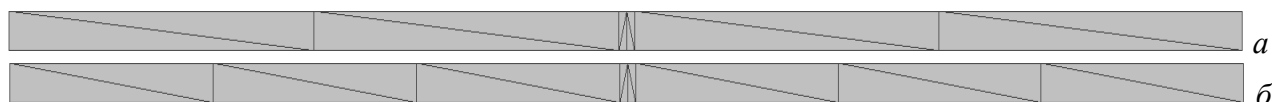


Рис. 3. Дискретизация диполя из рис. 2 при шаге дискретизации  $\lambda/8$  (а) и  $\lambda/10$  (б)

Из полученных результатов видно, что значения входного импеданса имеют незначительные отклонения от результатов по подходу из [7]. Максимальное отклонение около 10 %, а минимальное примерно 3,5 %. Время вычисления при шаге дискретизации  $\lambda/8$  по I и II составило 3,3 мс и 5,9 мс, а при шаге дискретизации  $\lambda/10$  – 3,8 мс и 6,6 мс соответственно, т.е. время моделирования сократилось примерно в 1,8 раза.

Таблица 1

**Значения входного импеданса диполя и отклонения значений по подходу I от подхода II**

Шаг дискретизации	$f$ , МГц	Подход I	Подход II	Отклонение, %
$\lambda/8$	75	80,96+j12,93	84,85+j11,51	4,83
	150	173,94-j278,46	169,06-j260,29	6,06
	225	61,59-j116,32	50,37-j109,45	9,91
$\lambda/10$	75	89,9+j24,27	88,89+j21,42	3,36
	150	130,57-j303,43	147,92-j286,24	7,58
	225	63,66-j69,25	57,42-j72,26	7,51

**IV. Заключение**

Рассмотрена возможность вычисления входного импеданса антенн методом моментов с помощью барицентрического деления на 4 подтреугольника. На примере диполя проведено тестирование, из которого видно, что отклонения входного импеданса от полученного при делении на 9 подтреугольников незначительно. Максимальное отклонение составило около 10 %, а время вычисления сократилось примерно в 1,8 раза.

Научный руководитель Куксенко Сергей Петрович, профессор кафедры телевидения и управления, доктор технических наук, доцент, ТУСУР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

**Библиографический список**

1. Григорьев А. Д. Методы вычислительно электродинамики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 432 с.
2. Makarov S. N., Noetscher G. M., Nazarian A. Low-frequency electromagnetic modeling for electrical and biological systems using MATLAB. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 598p.
3. Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А. Ключкин Д. В., Комнатнов М. Е., Куксенко С. П. Система компьютерного моделирования антенн методом моментов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. №. 1.С. 49–66.
4. Gibson W. C. The method of moments in electromagnetics. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2021. 272 p.

5. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation, 1982. Vol. 30, P. 409–418.

6. Freno B. A., et al. Characterization and integration of the singular test integrals in the method of moments implementation of the electric field integral equation // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2021. Vol. 124. P. 185–193.

7. Makarov S. N. Antenna and EM Modeling with MATLAB. New Jersey: Princeton University Press, 2002. 288 p.

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 07.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Д. М. Мочалов, Д. В. Клюкин, 2023

УДК 004.732

*А. И. Набоко*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СВЯЗИ ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА 802.11**

**Аннотация.** Статья представляет обзор основных стандартов серии 802.11, используемых для организации беспроводной сети связи. В статье рассмотрены преимущества и недостатки каждого стандарта, а также области их применения. Также была предложена конфигурация Wi-Fi (Wireless Fidelity) сети для офиса, учитывающая особенности организации и требования к скорости передачи данных. В целом, статья позволяет получить общее представление о технологиях беспроводной связи и выбрать оптимальную конфигурацию Wi-Fi сети для организации.

**Ключевые слова:** Wi-Fi, 802.11, беспроводная сеть, точка доступа, пропускная способность.

### **I. Введение**

В современном мире, где мобильность и гибкость стали ключевыми факторами успешного функционирования организаций, беспроводные сети связи выступают в роли важного инструмента для обеспечения эффективного обмена информацией и расширения возможностей сотрудничества. С учетом растущих требований к пропускной способности, безопасности и надежности, разработка и внедрение беспроводных сетей связи организаций на основе стандарта 802.11 становится актуальной и важной задачей. В данной статье рассматриваются основные аспекты проектирования беспроводной сети связи организации на основе стандарта 802.11, включая анализ требований, выбор оборудования, планирование топологии и развертывание сети.

Стандарт IEEE 802.11, также известный как Wi-Fi (Wireless Fidelity – беспроводная точность), представляет собой набор протоколов и технологий, разработанных для обеспечения беспроводной связи между устройствами в локальной сети. С момента своего появления стандарт прошел через ряд значительных обновлений, предоставляя разработчикам и системным интеграторам все больше возможностей для создания мощных и

надежных сетей связи. Однако, вместе с этим возросли и сложность проектирования, а также риск ошибок и проблем при внедрении.

Цель данной научной статьи заключается в том, чтобы предоставить практическое решение планируемой беспроводной сети на основе стандарта 802.11 для организации с целью последующей ее реализации. Мы изучим основные принципы и рекомендации по выбору оборудования, а также представим методику планирования и оптимизации топологии сети.

## II. Обзор существующих стандартов 802.11

С момента введения стандарта 802.11 в 1997 году было внесено множество изменений, направленных на улучшение его производительности, скорости и дальности действия. В результате существует несколько различных типов стандартов 802.11, каждый со своими уникальными функциями и возможностями.

Далее представлен краткий обзор основных стандартов серии 802.11, которые используются для организации беспроводной сети связи [1]. Для наглядности, преимущества и недостатки каждого стандарта будут представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Обзор стандартов 802.11**

Стандарт	Год введения	Частотный диапазон	Пропускная способность	Преимущества	Недостатки
802.11a	1999	5 ГГц	До 54 Мбит/с	Высокая скорость передачи данных, меньше помех	Меньший радиус действия, высокая стоимость оборудования
802.11b	1999	2,4 ГГц	До 11 Мбит/с	Большой радиус действия, низкая стоимость оборудования	Низкая скорость передачи данных, подверженность помехам
802.11g	2003	2,4 ГГц	До 54 Мбит/с	Высокая скорость передачи данных, обратная совместимость	Меньший радиус действия по сравнению с 802.11b
802.11n	2009	2,4 ГГц и 5 ГГц	До 600 Мбит/с	Увеличенная скорость передачи данных, ММО-технология	Необходимость использования двух частотных диапазонов
802.11ac	2013	5 ГГц	До 1,3 Гбит/с	Высокая пропускная способность, улучшенная ММО-технология	Меньший радиус действия, высокая стоимость оборудования
802.11ax	2019	2,4 ГГц и 5 ГГц	До 10 Гбит/с	Очень высокая пропускная способность, улучшенная эффективность	Требует обновления всего оборудования, высокая стоимость

Среди стандартов 802.11 наиболее часто применяются 802.11n, 802.11ac и 802.11ax. Это связано с рядом причин, которые делают их наиболее предпочтительными для использования в современных беспроводных сетях.

802.11n:

- Он предлагает значительное увеличение пропускной способности по сравнению с предыдущими стандартами (до 600 Мбит/с), что делает его подходящим для большинства приложений и услуг, таких как передача видео и голосовых данных.
- Этот стандарт поддерживает работу в двух частотных диапазонах (2,4 ГГц и 5 ГГц), что позволяет уменьшить вероятность возникновения помех и увеличить стабильность сети.
- Технология MIMO (Multiple Input, Multiple Output) позволяет одновременно использовать несколько антенн для передачи и приема данных, что улучшает качество связи и увеличивает пропускную способность.

802.11ac:

- Стандарт обеспечивает еще более высокую пропускную способность (до 1,3 Гбит/с) по сравнению с 802.11n, что позволяет еще более эффективно передавать большие объемы данных и использовать более требовательные к пропускной способности приложения.
- Работает только на частоте 5 ГГц, что обеспечивает меньшее воздействие помех и улучшает стабильность сети.
- Улучшенная MIMO-технология позволяет использовать до 8 антенн, что существенно повышает качество связи и пропускную способность.

802.11ax (Wi-Fi 6):

- Данный стандарт предлагает самую высокую пропускную способность (до 10 Гбит/с), что делает его идеальным для использования в сетях с высокими требованиями к скорости передачи данных.
- Работает на двух частотах (2,4 ГГц и 5 ГГц) и предлагает значительно улучшенную эффективность, благодаря использованию технологий OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) и MU-MIMO (Multi-User MIMO).

### **III. Оценка требований организации к проектируемой сети**

Для расчета оптимальной конфигурации Wi-Fi сети для данной организации необходимо учитывать следующие факторы:

- **Размер и форма помещения:** помещение имеет площадь 800 квадратных метров, поэтому для обеспечения хорошего сигнала Wi-Fi в каждом уголке помещения необходимо использовать несколько точек доступа.
- **Количество пользователей:** в соответствии с требованиями организации, количество одновременных пользователей составляет 40 человек.
- **Используемые приложения:** для расчета требуемой пропускной способности сети необходимо знать, какие приложения будут использоваться в офисе. Если организация использует большое количество приложений, которые потребляют большой объем трафика, то требуемая пропускная способность сети будет выше.
- **Формат работы:** необходимо также учитывать формат работы в офисе. Если пользователи будут работать с большим объемом данных, например, при обработке графических файлов, то требуемая пропускная способность сети будет выше.

Исходя из этих факторов, можно предложить следующую конфигурацию Wi-Fi сети для данной организации:

- **Установить 4 точки доступа:** расположить каждую точку доступа так, чтобы покрыть каждую четверть офисного помещения.

- Каждая точка доступа должна иметь пропускную способность не менее 200 Мбит/сек.
  - Для обеспечения стабильного и качественного Wi-Fi сигнала рекомендуется использовать точки доступа с технологией MU-MIMO, которая позволяет передавать данные нескольким пользователям одновременно.
  - На карте помещения организации можно отобразить расположение точек доступа, чтобы было понятно, какая зона помещения будет покрыта каждой точкой.
  - Для обеспечения требуемой скорости передачи данных (5 Мбит/с на пользователя) необходимо установить скорость передачи не менее 200 Мбит/с на каждую точку доступа.
  - Для обеспечения безопасности сети можно использовать защиту WPA2-PSK или WPA3-PSK и ежемесячно менять пароль для доступа к Wi-Fi.
  - Для обеспечения бесперебойной работы сети можно использовать резервирование источника питания.
- Схема офисного помещения организации, для которой проектируется Wi-Fi сеть, представлена на рис. 1.

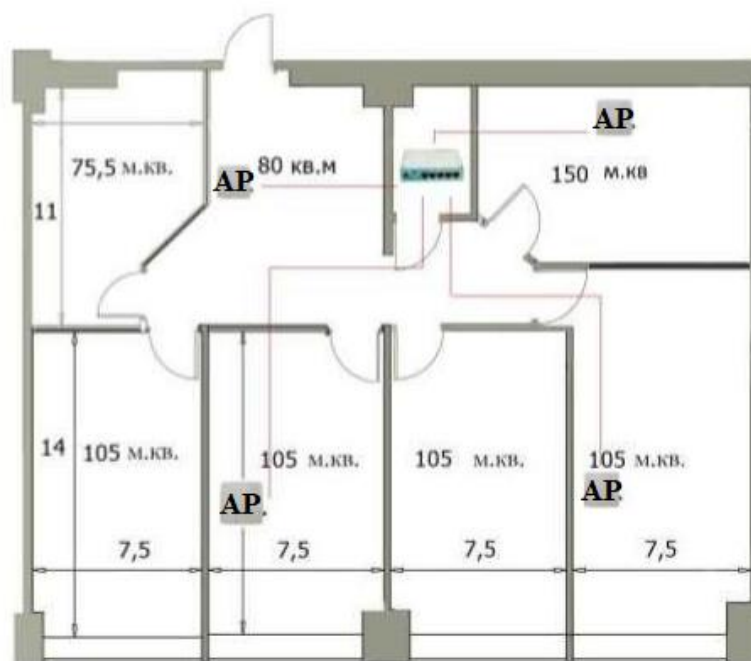


Рис. 1. Схема офиса. AP (Access Points) – точка доступа

При расстановке учитывалась равноудаленность AP друг от друга, для того чтобы наиболее эффективно их использовать (чтобы перекрытие одних и тех же зон разными AP было наименьшим). Кроме того, были приняты во внимание препятствия в виде стен, из-за которых распространяющийся сигнал испытывает затухание. Кроме того в складском помещении будет размещен маршрутизатор, подключенный к глобальной сети.

Учитывая множество параметров, исходя из следующей формулы, получили дальность связи, равную 250 метров, что удовлетворяет требования технического задания, а также плану размещения точек доступа.

$$D = 10^{\left(\frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} \lg F\right)}, \text{град} \quad (1)$$

где D – дальность связи; FSL – потери в свободном пространстве; F – частота сигнала, равная 2,4 ГГц.



Следующим планируемым этапом в проектировании работы является планирование Wi-Fi сети в специальном ПО (программное обеспечение), например, реализация двухмерной цветовой карты офиса в D-Link Wi-Fi Planner PRO. Такая схема позволяет более наглядно получить информацию о затухании сигнала.

#### **IV. Заключение**

В данной работе был проведен сравнительный анализ основных стандартов серии 802.11, которые используются для организации беспроводной сети связи, показал, что каждый стандарт имеет свои преимущества и недостатки. Например, стандарт 802.11n обеспечивает более высокую скорость передачи данных, чем стандарт 802.11g, но имеет более высокую цену. Стандарт 802.11ac имеет еще более высокую скорость передачи данных, но требует соответствующего оборудования и пропускной способности. Кроме того, стандарты имеют различные области применения, включая домашние и офисные сети, общественные места и т.д.

Кроме того, был рассмотрен вопрос организации Wi-Fi сети для офиса. Была предложена конфигурация, которая включает 4 точки доступа с пропускной способностью не менее 200 Мбит/сек и технологией MU-MIMO для обеспечения стабильного сигнала в каждой зоне помещения. Также было отмечено, что для обеспечения безопасности сети необходимо использовать защиту WPA2-PSK или WPA3-PSK и ежемесячно менять пароль для доступа к Wi-Fi.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Лутченко Сергей Святославович, Омский государственный технический университет.

#### **Библиографический список**

1. Лазарев Д. А., Хасанов Э. А.. Основы технологий Wi-Fi, её особенности и принципы работы // StudNet. 2021. Т. 4, № 7. С. 140.

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. И. Набоко, 2023

УДК 621.37

*Я. А. Петриев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

#### **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ**

**Аннотация.** В рамках статьи рассматривается возможность применения мобильной базовой станции в текущей сети сотового оператора. А также рассматривается возможность её применения для обеспечения связи в отдалённых районах, увеличение ёмкости существующей сети при такой потребности, применение во время непредвиденных обстоятельств или чрезвычайной ситуации (ЧС).

**Ключевые слова:** мобильная базовая станция (МБС), сеть мобильной связи, радиопокрытие.

## **I. Введение**

Востребованность услуг связи и высокоскоростного интернета с каждым годом только возрастает. Людям необходимы большие скорости передачи информации. Для обеспечения таких потребностей необходимы более высокие частоты, как следствие необходимо чаще ставить базовые станции и нести большие эксплуатационные расходы [2]. Если стационарная базовая станция не может обеспечить покрытие по какой-либо причине, то на помощь приходит мобильная базовая станция (МБС).

## **II. Постановка задачи**

В различных ситуациях возникает потребность в кратчайшие сроки обеспечить радиопокрытие на определённом участке местности, временно заменить неисправную базовую станцию, либо обеспечить нужную ёмкость сети. В связи с этим становится актуальным использование мобильных базовых станций, позволяющих решить перечисленные выше задачи.

## **III. Применение мобильной базовой станции**

Базовые станции (БС) – это самый близко расположенный к абоненту элемент сети связи, но не всегда стационарные БС могут решить вопрос с обеспечением хорошего покрытия. В таких случаях на помощь приходит альтернатива в виде мобильной БС, которая может помочь обеспечить связь в следующих случаях [1].

- Необходимость временного обеспечения объекта связью.

В этом случае мобильная базовая станция нужна для обеспечения связью участка местности или конкретного объекта на короткий период (от нескольких дней до года). К примеру, нужно будет обеспечить связь на время строительства моста, автодороги или проведения массового мероприятия на открытом воздухе.

В формате таких мероприятий собирается несколько тысяч человек, которых необходимо обеспечить услугами связи, при этом существующее покрытие может быть недостаточным, а при большом удалении покрытия может и вовсе не быть [3].

- Повышение качества связи в определённый период времени.

Возникают случаи, когда базовые станции не справляются с большим количеством абонентов в относительно короткие периоды времени. Во время проведения массовых мероприятий одновременно на площади может собираться до нескольких тысяч человек, а текущая сеть может не предусматривать нужную ёмкость сети [3].

- Замена или ремонт одной из стационарных базовых станций.

Во время эксплуатации сети возникают ситуации с отключением и заменой одной из стационарных БС. Например, сотовому оператору нужно временно демонтировать базовую станцию на время проведения строительных работ. Несколько сотен человек могут остаться без услуг связи. На время проведения работ оператор может поменять стационарную БС на мобильную. Период ремонта и постройки новой станции занимает продолжительное количество времени и состоит из ряда этапов, приведем некоторые из них [1]:

- Подбор места для новой базовой станции, исходя из требований по радиопланированию, при этом новая БС должна закрыть зону, которую покрывала демонтированная БС.

- Заключение договора с собственниками и арендодателями о размещении базовой станции;

- Подбор и закупка оборудования, обеспечение процесса строительства всеми необходимыми материалами;

- Постройка новой базовой станции и ввод её в эксплуатацию.

- Обновление текущего оборудования или тестирование новой конфигурации БС.

Технологии сотовой связи постоянно развиваются, оборудование при этом необходимо обновлять. Перед обновлением необходимо протестировать оборудование, чтобы понять, не мешает ли оно работе других радиотехнических служб и средств.

Сотовый оператор получает ограниченное количество оборудования и для более быстрого тестирования и ввода в эксплуатацию может использовать мобильную базовую станцию, также может протестировать и новую конфигурацию БС, если требуется добиться более высокого уровня сигнала для абонентов [2].

- Обеспечение мобильной связи в зоне ЧС.

Сложно представить повседневную жизнь без сотового телефона, роль которого в жизни человека кратно возрастает в зоне чрезвычайной ситуации или стихийного бедствия.

Во всех перечисленных случаях строительство базовой станции не является рациональным и необходимым решением, но возможно обойтись установкой мобильной базовой станции, которую можно легко убрать, если необходимости в ней в дальнейшем уже не будет.

Мобильная базовая станция (МБС) располагается на колесах и внешне напоминает стандартный фургон или автомобиль повышенной проходимости, в развернутом положении её легко заметить по мачте и антенному оборудованию на ней.

МБС обязательно должна стать частью сети сотового оператора, для этого необходимо обеспечить радиоканал с ближайшей базовой станцией. Наиболее распространённый способ – это обеспечение радиорелейного канала [3].

На ближайшей БС размещается антенна радиорелейной связи, как и на МБС. Существуют и другие способы создания транспортного канала: подключение по ВОЛС или через спутник.

Для работы системы антенн необходимо приёмопередающее оборудование, которое размещено в МБС. Для работы оборудования необходимо обеспечить его электроэнергией. Для этого МБС в обязательном порядке оснащены генераторами, а некоторые подключаются к электросети 220/380 В. В случае отключения электроэнергии абоненты не останутся без связи, поскольку емкости топливного бака генератора самой маленькой МБС хватает на сутки работы.

МБС – универсальный, гибкий и многофункциональный инструмент для решения различных задач на сети сотовой связи.

#### **IV. Виды МБС**

- МБС на шасси микроавтобуса. Максимальная высота мачты в среднем 12 метров. Топливный бак рассчитан на сутки непрерывной работы базовой станции.
- МБС типа блок-контейнер. Максимальная высота мачты в среднем 15 метров. Может обеспечивать связь в течение недели непрерывной работы.
- Мобильный комплекс сотовой связи (МКСС) на шасси КАМАЗ-43118. Мобильный комплекс сотовой связи (МКСС) на шасси КАМАЗ-43118 Предназначен для работы как в полевых, так и в городских условиях, может обеспечить связь в течение недели непрерывной работы [3].

#### **V. Заключение**

Когда сотовому оператору требуется обеспечить временное покрытие или увеличить емкость существующей сети, то можно применять мобильную базовую станцию. Для решения специфических задач существуют различные виды МБС, применение каждой из которых позволяет решить потребность населения в услугах сотовой связи.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Копытов Евгений Юрьевич, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Телекоммуникационная компания «Мегафон»: офиц. сайт. URL: <https://gov.megafon.ru/products/peredviznaya-bazovaya-stanciya> (дата обращения: 27.03.2023).
2. Информационное агентство «РИА Новости»: офиц. сайт. URL: <https://ria.ru/20220921/svyaz-1812068870.html> (дата обращения: 29.03.2023).
3. Телекоммуникационная компания «Мегафон»: сайт. URL: <https://habr.com/ru/company/megafon/blog/665968/> (дата обращения: 29.03.2023).

*Дата поступления статьи: 04.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 11.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Я. А. Петриев, 2023

УДК 621.396.67

*М. С. Погребной, Г. И. Грачев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## РАЗРАБОТКА АНТЕННЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

**Аннотация.** В статье представлен вариант передающей апериодической антенны, обладающей повышенной эффективностью. В нем используется замена оконечных нагрузок приземными антеннами, а также были проведены результаты электродинамического моделирования. Данный метод повышения эффективности антенн с оконечными нагрузками может быть использован как для разработки новых, так и для модернизации и перестройки существующих антенн радиоцентров без изменения их габаритов.

**Ключевые слова:** дипольная апериодическая антенна, антенна бегущей волны, коэффициент усиления.

### I. Введение

Антенны бегущей волны (АБВ) или низкорасположенные апериодические антенны с оконечными нагрузками (ОН) представляют собой систему токонесущих проводников, нагруженных на сопротивление, которое равно волновому сопротивлению излучателя [1].

Этот тип антенн имеет недостаток, заключающийся в том, что при снижении рабочей частоты происходит уменьшение направленности и эффективности из-за увеличения потерь мощности сигнала в оконечном сопротивлении, что приводит к увеличению рассеиваемой мощности полезного сигнала.

На данный момент существуют следующие методы улучшения производительности апериодических антенн:

- Снижение волнового сопротивления излучателя, что приводит к увеличению коэффициента полезного действия (КПД) [2].
- Применение схемы Неймана при построении антенн бегущей волны [3].

Антенны из длинных проводов, такие как однопроводная антенна бегущей волны, наклонная V-образная и другие, длина токонесущих проводников которых составляет несколько длин волн, нельзя отнести к классу малогабаритных антенн. Поэтому метод

повышения КПД путем снижения входного сопротивления не обеспечивает значительного увеличения эффективности.

## II. Постановка задачи

Целью работы является дополнение и улучшение метода повышения эффективности аperiodических антенн, известного как метод Неймана, а также подтверждение его работоспособности. Для проверки работоспособности предложенного метода был проведен анализ электродинамических моделей антенн с помощью пакета прикладных программ, который реализует метод конечных элементов. В дальнейшем планируется экспериментальная проверка эффективности дипольной аperiodической антенны на короткой трассе, а также исследование других методов электродинамического анализа для выявления наиболее подходящего для данного типа антенн.

## III. Теоретические сведения

Схема Неймана – это метод замещения резистивной нагрузки аperiodической антенны дополнительной антенной, который позволяет использовать часть мощности сигнала, обычно рассеиваемую в нагрузке, для повышения КПД [4]. При этом на вход дополнительной антенны подается часть сигнала через отрезок линии передач, что обеспечивает синфазность сигналов на входах обеих антенн. Однако использование этой схемы может привести к потере широкополосности системы антенн, так как синфазность питания обеспечивается только на определенных дискретных частотах в рабочем диапазоне.

Результирующий КПД системы из одиночного антенного элемента (АЭ), с введенным в конструкцию вторичным антенным элементом, замещающим оконечную резистивную нагрузку, определен через отношение суммы мощностей  $P_1$ , излученной одиночной аperiodической антенной с КПД  $\eta_1$  и  $P_2$ , излученной вторичным антенным элементом с КПД  $\eta_2$ , к общей подведенной к антенной системе мощности  $P$ .

Мощность  $P_2$  определена КПД  $\eta_1$ , как доля не излученной одиночной аperiodической антенной мощности  $P$ , доведенной до вторичного антенного элемента, а именно  $(1-\eta_1)P$ , а также КПД вторичного антенного элемента как:

$$P_2 = \eta_2(1 - \eta_1)P \quad (1)$$

Следовательно, результирующий КПД  $\eta$  антенной системы из одиночного антенного элемента с введенным в конструкцию вторичным антенным элементом, замещающим оконечную резистивную нагрузку может быть представлен в виде:

$$\eta = \frac{P\eta_1 + \eta_2(1-\eta_1)P}{P} = \eta_1 + \eta_2(1 - \eta_1) \quad (2)$$

где  $P$  – мощность, подводимая ко входу антенной системы,  $P_1$  – мощность, излученная одиночной аperiodической антенной,  $\eta_1$  – КПД одиночной аperiodической антенны,  $P_2$  – мощность, излученная вторичным антенным элементом,  $\eta_2$  – КПД вторичного антенного элемента. Числитель включает, как мощность, излучаемую одиночной антенной  $P\eta_1$ , так и мощность  $\eta_2(1-\eta_1)P$ , которая вместо рассеяния в оконечной нагрузке идет на излучение вторичным антенным элементом [4].

Был проведен анализ энергетических характеристик дипольной аperiodической антенны, расчеты которой включали использование как резистивных нагрузок, так и приземных антенных элементов. Анализ проводился в диапазоне частот от 3 до 10 МГц, так как снижение эффективности антенны с оконечными нагрузками наблюдается преимущественно в низкочастотном диапазоне [1]. Для расчетов использовалась подстилающая поверхность со следующими параметрами: диэлектрическая проницаемость 3 и проводимость 0,001 См/м, что соответствует сухой почве. При увеличении проводимости

подстилающей поверхности предложенный метод будет обеспечивать более высокий энергетический выигрыш.

#### IV. Результаты моделирования

Схематичное изображение аperiodической дипольной АБВ показано на рис. 1. Вычисленные значения превосходства в коэффициенте усиления (КУ) аperiodической антенны, построенной по предложенному принципу, над аperiodической антенной с конечными резистивными нагрузками представлены на рис. 2. Длина первичного излучателя диполей – 7 метров, высота мачтового устройства – 4 метра. Приземная антенна выполнена в форме фрактала площадью 3х3 метра с общей длиной провода 96 метров.

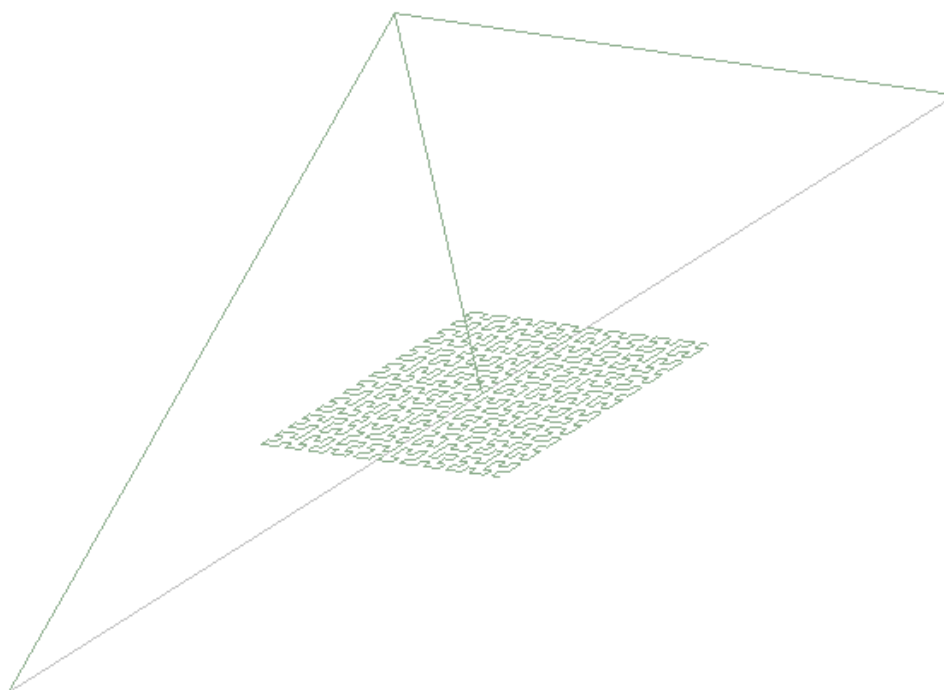


Рис. 1. Схематичное изображение аperiodической дипольной АБВ

Результаты электродинамического моделирования АБВ с ОН, замещенными вторичными приземными АЭ, показали возможность увеличения КУ относительно оригинальной антенны с резистивными ОН до 8 дБ в низкочастотной области рабочего диапазона при сохранении эффективности в остальной его части.

#### V. Заключение

В объеме работы по теме «Разработка антенны бегущей волны декаметрового диапазона волн повышенной эффективности», на момент написания статьи можно сделать следующие выводы: замена конечных резистивных нагрузок на приземные антенны в конструкции низкорасположенных аperiodических антенн позволяет получить следующие преимущества:

- Увеличение коэффициента усиления антенны.
- Повышение допустимой мощности, что обеспечивает более надежную связь.
- Нет необходимости в системах охлаждения для конечных нагрузок, так как всю рассеиваемую мощность поглощает подстилающая поверхность.

В заключение также хотелось бы отметить, что метод повышения эффективности аperiodических антенн с помощью замены конечных нагрузок может использоваться не

только при проектировании, но и для модернизации и реконструкции уже существующих антенн радиоцентров без изменения их размеров.

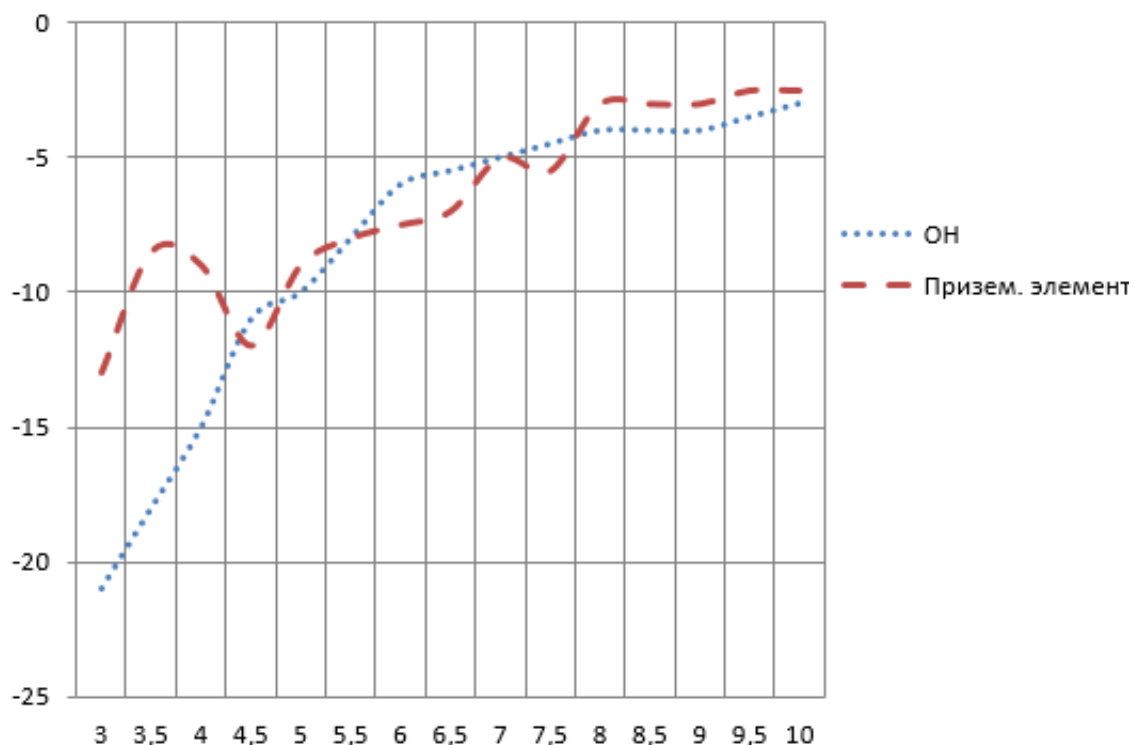


Рис. 2. Графики результатов моделирования частотных зависимостей КУ АБВ с резистивными ОН и с вторичными антенными элементами в качестве ОН

Научный руководитель: ст.преп., Киселев Дмитрий Юрьевич, Омский государственный технический университет.

#### Библиографический список

1. Лавров Г. А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. М.: Советское радио, 1965. 472 с.
2. Гуляев Ю. В., Неганов В. А. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
3. Надененко С. И. Антенны. М.: Государственное издание литературы по вопросам связи и радио, 1959. 552 с.
4. Сосунов Б. В., Филипов В. В. Основы расчета подземных антенн. Л.: ВАС. 1990. 472 с.
5. Balanis C. A. Antenna theory. Analysis and design. John Wiley & Sons, Inc., 2016. 1099 с.
6. Попов О. В., Сосунов Б. В., Фитенко Н. Г., Хитров Ю. А. Методы измерений характеристик антенно – фидерных устройств. Л.: ВАС. 1990. 182 с.

Дата поступления статьи: 28.03.2023

Дата одобрения после рецензирования: 05.04.2023

Дата принятия к публикации: 19.06.23

© М. С. Погребной, Г. И. Грачев, 2023

*М. М. Подрясов, Н. И. Горлов*

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
г. Новосибирск, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ОПТОВОЛОКОННЫМ СИСТЕМАМ ПЕРЕДАЧ**

**Аннотация.** Исследуется проблема несанкционированных подключений, связанная с изменением и цифровизацией сфер человеческой деятельности, в которой основным средством передачи данных является оптоволокно. Представлены варианты детектирования незаконных присоединений и методы извлечения информации из оптического волокна. Из приведенных способов наиболее простым является изгиб оптоволокна для нарушения условий полного внутреннего отражения. В этом случае в системе мониторинга для обнаружения изгибов волокон необходимо отслеживать внесенные потери.

**Ключевые слова:** несанкционированное подключение, съём информации, оптическое волокно, рефлектограмма.

### **I. Введение**

В наши дни актуальным является изменение и цифровизация сфер человеческой деятельности, в которой основным средством передачи данных является оптоволоконная система.

Применение оптического волокна полностью не обеспечивает защищенность передаваемой информации. Небольшая часть выведенного излучения, в результате специальных действий нарушителя, при наличии оптико-электронного оборудования с высоким уровнем чувствительности, может быть сфокусирована и преобразована.

Именно поэтому случаи несанкционированного доступа к оптическому волокну могут привести к потере конфиденциальных данных, утечке коммерческой информации и даже к нарушению безопасности государства.

Одним из этапов борьбы против актов незаконного вмешательства является обнаружение факта подключения, для этого стоит рассмотреть некоторые методы съема информации из оптического волокна.

Таким образом, сегодня существует проблема, связанная с недостаточным уровнем информационной безопасности в оптоволоконных системах. Задача обнаружения несанкционированного подключения к оптическому волокну является важным аспектом обеспечения безопасности работы оптических сетей. Её решение помогает предотвратить утечку конфиденциальной информации и другие нарушения в работе сети.

### **II. Постановка задачи**

Для защиты информации, передаваемой в ВОСП (Волоконно-оптическая система передачи), были разработаны два основных подхода.

Первый подход связан с защитой содержательной составляющей передаваемых сигналов, используя такие методы как криптография, кодовое зашумление и детерминированный хаос. Этот метод считается надежным, но требует дорогостоящего оборудования и организации обмена ключами при использовании криптографии. Кроме того, он не позволяет отслеживать несанкционированный доступ.

Второй подход основан на мониторинге и защите передаваемого оптического излучения, что позволяет отслеживать попытки несанкционированного доступа, имеет более



низкую стоимость и может применяться в сетях различных уровней иерархии, а также не зависит от структуры и скорости передачи цифровых сигналов.

### III. Методы съема информации с ВОСП

Как известно, сегодня развитие сетей связи осуществляется путем внедрения волоконно-оптических системы передачи. Однако вместе с развитием использования оптического волокна в телекоммуникационных системах развиваются и системы технической информационной разведки, в результате чего возникает риск несанкционированного получения информации из оптоволоконных систем связи. Поэтому вопрос изучения технических возможностей несанкционированного доступа к информации ВОСП является актуальным, и в результате таких исследований можно будет разработать эффективные методы защиты от атак, осуществляемых с целью несанкционированного доступа к информации, передаваемой по оптическому волокну [1].

Поэтому в целях разработки эффективных методов борьбы с современными техническими средствами, обеспечивающими несанкционированный доступ к информации в ВОСП, в первую очередь к оптическому излучению в ВОСП без разрешения необходимо проанализировать возможные методы съема информации. Известно, что устройства ВОСП в основном состоят из двух частей, то есть станционных и линейных устройств. Безопасность в станционной части ВОСП считается высокозащищенной с точки зрения того, что такие участки являются сертифицированными объектами и на них организован полный цикл организационно-технических мероприятий по обеспечению информационной безопасности. Поэтому в этой связи можно отметить, что основным слабым местом ВОСП, где может быть осуществлен несанкционированный доступ к информации, является линейный тракт ВОСП, то есть ее широкий кабельный отвод.

Несанкционированный доступ к информации через линейный тракт в основном делится на следующие две группы [2]:

- Несанкционированный доступ к информации без повреждения оптического волокна. Таким образом, сбор информации осуществляется путем утечки незаметной части энергии оптического сигнала, проходящего по волокну, из оболочки волокна и регистрации (приема) этой утечки энергии с помощью специальных устройств.

- Методы получения информации без разрешения, нарушающие целостность оптического волокна. Примеры таких методов включают подключение компенсатора потерь в волокне и извлечение части энергии из оптического сигнала. При несанкционированном подключении методы несанкционированного доступа к информации в ВОСП делятся на следующие типы:

- Пассивный метод.
- Активный метод.

Пассивные методы обладают высоким уровнем секретности, так как при использовании этого метода при несанкционированном доступе к информации, передаваемой по оптическому волокну, не происходит никаких изменений параметров оптического сигнала, передаваемого по оптическому волокну. Это обеспечивает конфиденциальность несанкционированного доступа к линейному тракту. Но этот метод имеет относительно низкую эффективность. Поэтому для осуществления несанкционированного доступа к информации таким способом, как правило, выделяют участки линейного тракта волоконно-оптических систем связи, где происходит утечка значительной части энергии оптического сигнала.

Например, кабельные вводы, защищающие места соединения оптических кабелей, накопительные ямы, участки линейных трактов, где расположены различные проходные сетевые устройства подробнее ознакомиться с местами съема, можно ознакомиться на рис. 1, где 1 – передатчик оптического сигнала; 2 – приемник оптического сигнала; 3 –

оборудование мультиплексирования; 4 – оптическое волокно; 5 – сварное соединение двух оптических волокон; 6 – соединительная муфта; 7 – пункт регенерации усиления оптического сигнала.[3]

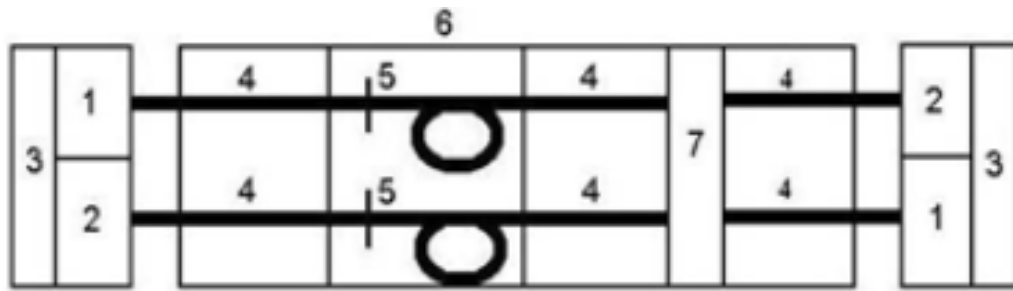


Рис. 1. Потенциально-возможные места съема сигнала с волоконно-оптической системы передачи

Активный метод несанкционированного доступа к информации осуществляется путем принудительной утечки значительной части энергии оптического сигнала, передаваемого по волокну, и поэтому обладает высокой эффективностью. Однако при таком несанкционированном доступе к информации параметры оптического сигнала (уровень мощности в канале, модовая структура излучения) изменяются, что облегчает обнаружение несанкционированного доступа.

#### IV. Методы обнаружения подключения

Системой на базе обнаружения факта несанкционированного подключения является система диагностики состояния (СДС) [4,5]. Её необходимо построить с анализом или прошедшего через оптический тракт сигнала, или отраженного сигнала, с использованием рефлектометра. Схема включения аппаратуры рефлектометрии приведена на рис.2.



Рис. 2. Блок-схема импульсного оптического рефлектометра

В ВОСП на передающем конце посредством оптического разветвителя подключалась аппаратура оптической рефлектометрии. Контроль состояния волоконно-оптического тракта позволяет при этом выявлять появившиеся неоднородности, анализ которых позволяет фиксировать несанкционированный съем информации, вызывающие эту неоднородность. Важнейшим преимуществом является возможность точного определения координаты места предполагаемого несанкционированного снятия информации. Схема включения аппаратуры рефлектометрии приведена на рис. 3.

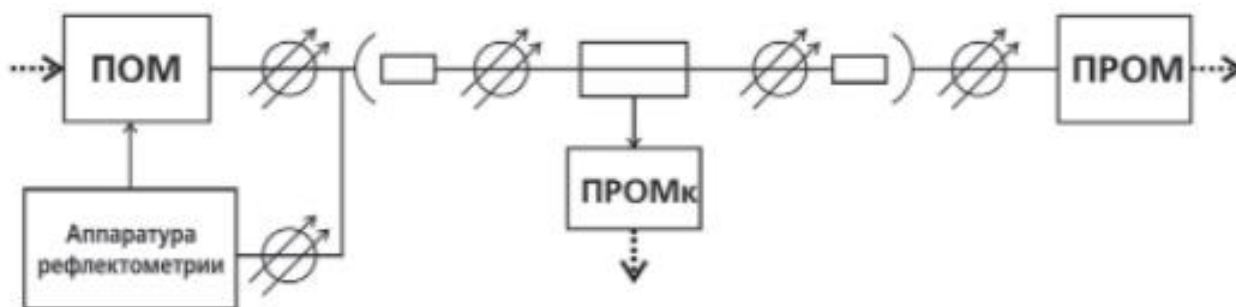


Рис. 3. Вариант схемы подключения рефлектометра в ВОСП

Устройство для несанкционированного сбора данных расположено на расстоянии 250 метров от передающего оптического модуля. Если установить рефлектометрическое оборудование на обоих концах волоконно-оптического кабеля и/или увеличить количество производимых измерений, то ошибочность в определении координат дефекта или места удаления может быть уменьшена.

СДС на базе прошедшего сигнала, подвергнутым анализу, является самым простым методом диагностики. Принятый сигнал подвергается анализу на приемной участке ВОСП. При НД (Несанкционированный доступ) происходит процесс преобразования сигнала, это изменение регистрируется и передается в блок управления ВОСП. При эксплуатации устройства анализа коэффициента ошибок на приемном модуле ВОСП, СДС реализуется с минимальными изменениями в оборудовании ВОСП, поскольку нужные модули уже находятся в оборудовании ВОСП. Недостатком является малый уровень чувствительности к изменениям в сигнале. Главным минусом СДС с анализом проходящего сигнала является отсутствие информации о координатах появившейся неоднородности, что не даёт возможности проводить более тонкий и подробный анализ изменений в ВОСП.

Для контроля уровня мощности сигнала обратного рассеивания в ОВ (Оптическое волокно) используется метод импульсной рефлектометрии. Идея заключается в том, что в ОВ вводится мощный кратковременный импульс, а на оконечном устройстве фиксируется полученное излучение, рассеянное в противоположном направлении на различных неоднородностях, по уровню интенсивности которого можно предположительно судить о происходящих потерях в ОВ, распределенных по его длине на расстоянии до 100-120 км. Изначальные рефлектограммы изучаемой системы передачи фиксируются в запоминающий модуль компьютера и сравниваются с необходимыми рефлектограммами. Локальное изменение рефлектограммы более чем на 0.1 дБ сообщает о возможной попытке получения несанкционированного доступа к ОВ и позволяет определить координату подключения, вычисляемую по формуле (1) [6]:

$$L_x = K_{ref} * \frac{\Delta t}{2} * \frac{c_0}{n_g}, [\text{км}] \quad (1)$$

где  $L_x$  – измеряемая координата несанкционированного подключения, км  $\Delta t$  – разность времени между пиками начального и конечного импульса, с,  $n_g$  – групповой показатель

преломления стекла сердцевины,  $c_0 = 3 * 10^8 \frac{M}{c}$  – скорость света в вакууме,  $K_{ref}$  – коэффициент отражения

Главными минусами СДС с анализом отраженного сигнала, основанного на методе импульсной рефлектометрии являются:

- Уменьшение динамического диапазона рефлектометров и контролируемого участка ВОСП при ее больших протяженностях.
- Чрезмерно мощные импульсы, поступающие в ОВ усложняют процесс мониторинга во время передачи данных, что уменьшает возможности СДС или усложняет и удорожает систему диагностики.

## **V. Заключение**

В результате проведенного анализа были сделаны необходимые выводы о существующих методах получения доступа к оптическому волокну, способах их детектирования и принципах работы.

Научный руководитель: проф., д.т.н., Горлов Николай Ильич, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики.

## **Библиографический список**

1. Тургунов Б. А., Халилов М. М. Современные способы защиты информационного сигнала от несанкционированного доступа в оптических сетях // САПР и моделирование в современной электронике: докл. 2-й Междунар.науч.практ.конф., 24–25 октября 2018 г. Брянск, 2018. Т. 1. С. 195–197.
2. Jurayev N. M., Xomidova N. Y., Yuldasheva X. X. Security analysis of urban railway systems: the need for a cyber-physical perspective // Cutting edge-science. 2020. P. 206.
3. Turgunov B. A., Juraev N. M., Toshpulatov S. M., Kovilov A. O., Iskandarov U. U. Researching of the degradation process of laser diodes used in optical transport networks. Proc. of the International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), November 3–5, 2021. Tashkent, 2021. P. 1–4.
4. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Gorlov N. I. Study of bend influences of optical fibers on Brillouin reflectograms // Proc. of the XIV International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings, Oct. 2–6, 2018. Novosibirsk, 2018. Vol. 1. p. 2. P. 140–144.
5. Трухина А. И., Богачков И. В., Горлов Н. И. Исследования влияния изгибов в оптических волокнах различных видов на трассы Бриллюэна // Системы генерации и обработки сигналов в области бортовой связи: докл. Междунар. науч. тех. конф., 20–12 марта, 2019. Москва, 2019, С. 1–4.
6. Yurchenko A. V., Mekhtiyev A. D., Shaigarayeva T. N., Alkina A. D., Neshina Y. G. Comparing methods of controlling unauthorized access to fiber-optic transmission lines // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1327, P. 4

*Дата поступления статьи: 30.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 27.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© М. М. Подрясов, Н. И. Горлов, 2023

## **ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ В РОССИИ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются новые технологии пятого поколения (5G - fifth generation), текущее состояние и перспективы развития сетей пятого поколения в России. Особое внимание уделяется выбору диапазона частот, так как это является главной проблемой при построении новой сети в стране. Представлены отечественные разработки базовых станций для стандарта нового поколения, которые в будущем планируют заменить иностранные разработки.

**Ключевые слова:** 5G (5 generation), мобильная связь, зона покрытия, диапазон частот.

### **I. Введение**

Мобильный стандарт 5G (5 generation) в некоторых зарубежных странах активно используются. В Российской Федерации системы связи 5G находятся на стадии разработки. Появляются тестировочные зоны, принять участие в которых может любой абонент с использованием необходимого оборудования. Существуют множество проблем, связанных с проектированием нового мобильного поколения – это выделение свободного частотного диапазона для 5G., выбор качественного оборудования, сетевой архитектуры и другие. Несмотря на это, технология тестируется на основе сетей предыдущих поколений и ведутся разработки отечественного оборудования. В данной статье будут рассматриваться решения разработчиков для проектирования нового поколения сети 5G в России.

### **II. Проблемы частотного ресурса**

Для разработки и создания любой системы связи необходимо наличие и незанятость определенного спектра частот. Для повышения скорости передачи данных и в целом повышения качества предоставляемых услуг в 5G с учетом резкого возрастания количества устройств Интернета возникла необходимость в использовании дополнительного частотного спектра.

Как отмечалось ранее, в 5G диапазон используемых частот делится на Frequency 1 (FR1) и Frequency 2 (FR2), но по документам Ассоциации Groupe Special Mobile (GSMA) International Mobile Telecommunication 2020 (IMT-2020) первый поддиапазон разбивают еще на частоты ниже 1 ГГц и 1–6 ГГц. Это делается для того, чтобы показать различия в предназначениях частот в FR1.

Волны с частотой колебаний ниже 1 ГГц делают 5G доступным в пригороде, в сельской местности, а также в зданиях с низкой возможностью проникновения электромагнитных волн, другими словами, они обеспечивают широкое покрытие сети.

Второй поддиапазон в FR1 в основном представлен частотами 3,3–3,8 ГГц. В нем сочетаются хорошая емкость сети и широкое покрытие зоны обслуживания. В случае невозможности использования указанных диапазонов, при разрешении правительства возможно применение 1,8 ГГц, 2,3 ГГц, 2,6 ГГц.

Диапазон FR2, включают частоты от 24 ГГц и выше, требуется для достижения сверхвысоких скоростей, но использование миллиметровых волн ограничено из-за особенностей распространения – они распространяются на малые расстояния и испытывают трудности с прохождением сквозь здания и, например, деревья [1].

Выделение спектра для 5G в России, как и во всем мире, определяется занятостью необходимых частот под определенные организации. Полосы частот для 5G показаны на рис. 1.

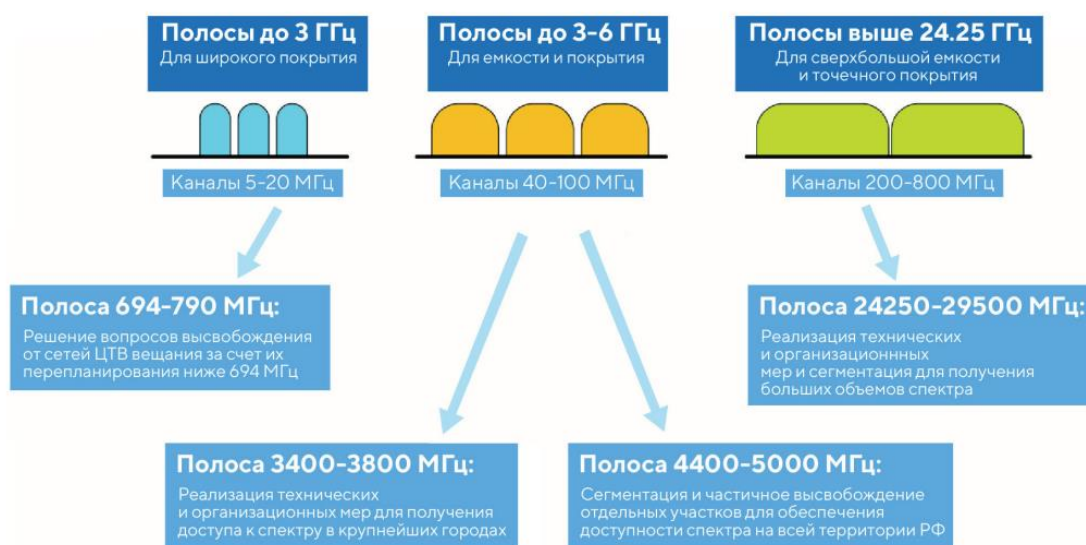


Рис. 1. Выделение частот для 5G в России

Рассмотрим вопросы освобождения частот для сетей пятого поколения в России более подробно [2]:

- В диапазоне радиочастот ниже 1 ГГц рассматриваются радиоволны 694-790 МГц, которые заняты сетями цифрового телевидения.

Этот вариант является наиболее исполнимым, так как в Европе уже прошли работы по смещению работы цифрового телевидения на более короткие волны при небольших затратах, но для того, чтобы выполнить такие операции в Российской Федерации, требуется проведение ряда мероприятий. Затруднение вызывает также то, что такие радиочастоты еще используются и в военных целях. Решение может быть найдено в виде перехода на более низкие волны с 790–862 и 880–960 МГц, но здесь возникают проблемы в связи с тем, что на этих частотах работает самолетное оборудование. Поэтому нужно будет провести работы по её замене, что повлечет за собой экономические и временные затраты.

- Для диапазона радиочастот от 1 до 6 ГГц в России рассматриваются электромагнитные волны 3,4–3,8 ГГц, 4,4–4,9 ГГц, а также частоты 5,9 ГГц.

Сейчас в РФ указанные первая и вторая полосы частот заняты радиоэлектронными средствами (РЭС) спутниковой службы, а результаты расчетов по электромагнитной совместимости свидетельствуют о том, для внедрения 5G требуется провести работы по изменению данных полос частот. Альтернативной может являться полоса 4,4-5,0 ГГц, которая меньше загружена, чем отмеченные выше частоты. Полосы частот 1,4–1,5 ГГц и 2,3–2,4 ГГц также трудно выделить под сети 5G, потому что они используются в телеметрии и в радиолокации.

- Спектр выше 6 ГГц используется для обеспечения высокоскоростной передачи данных. В спецификациях 3rd Generation Partnership Project (3GPP) в диапазоне используются частоты от 24,3 до 27,5 ГГц, от 26,5 до 29,5 ГГц, 27,5–28,3 ГГц и 37–40 ГГц.

Решений по выделению радиочастот этого диапазона в Российской Федерации еще не принято. Предполагается, что первые два отмеченных поддиапазона могут быть использованы в России, но для этого нужно обеспечить электромагнитную совместимость с

работающими в смежных частотах службами спутниковой связи исследования Земли, а также радиолокационными станциями.

Для 5G также рассматриваются диапазоны свыше 50 ГГц, однако на сегодняшний день применение на практике этого частотного диапазона не было.

Окончательное решение по выделению радиочастотного спектра в РФ будет принимать Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) по результатам научно-исследовательской работы (НИР).

### III. Решение операторов связи

В 2018 году было создано совместное предприятие посредством компаний «Ростелеком» и «МегаФон», куда в ближайшее время присоединится «Билайн», для выполнения работ по электромагнитной совместимости существующих сетей мобильной связи и другого назначения с сетями 5G и для выработки рекомендаций к радиочастотному спектру [1].

В 2019 году стало известно, что «МегаФон» передаст закрепленные за ними частоты в новое предприятие, для того чтобы представлять интересы от всех операторов связи. Так образовалась компания «Новые цифровые решения». Планируется в дальнейшем привлечь в работу оператора связи «МТС». Несмотря на это, «МТС» уже получила лицензию до 2025 года на создание собственной сети связи пятого поколения, а также сообщила, что запускает сеть самостоятельно [1].

Предприятие «Новые цифровые решения» продвигало идею использования частот 3,4–3,8 ГГц, но Совет Безопасности Российской Федерации её не поддержал, так как указанные диапазоны радиочастот используются в федеральных службах [1].

17 марта 2020 года ГКРЧ выдала лицензию на использование частотного спектра 24,25–24,65 ГГц для разработки и запуска систем связи 5G. [1].

Весной 2021 года Федеральная антимонопольная служба одобрила решение о совместном строительстве сетей пятого поколения компанией «Новые цифровые решения», а осенью 2021 года ГКРЧ разрешила выделение радиоволн 4,4–4,9 ГГц новой компании для проведения тестирования в течение двух лет. Отмечается, что по условиям соглашения между операторами связи, построенная сеть 5G должна обеспечивать работу всех сторон договора в равных условиях [1].

В «МТС» видят перспективы 5G для развития своей экосистемы, в основном для пользователей бизнеса. Станет возможным дистанционное управление оборудованием, роботами, другими автоматизированными системами с использованием технологий Virtual Reality (VR), появятся цифровые торговые залы, широко будут использоваться беспилотные дроны [1].



Рис. 2. Базовая станция российского производства



#### **IV. Тестирование сетей 5G**

Весной 2021 года Российский союз промышленников и предпринимателей обратился к Правительству РФ с просьбой принять решения о создании условий и запуске испытательных полигонов и пилотных зон для тестирования сетей связи пятого поколения, а также сертификации оборудования российского производства [1].

Предполагается, что в пилотных зонах будет использоваться как отечественное, так и зарубежное оборудование. При этом отмечается, что при тестировании требуется работать на тех же диапазонах частот, на которых планируется запуск сетей пятого поколения за рубежом.

Оператор «Tele2» и производитель оборудования «Ericsson» в 2019 году провели запуск первой пилотной зоны 5G в РФ на улице Тверская г. Москвы.

Сообщается, что сеть развернута на основе сети LTE и работает на частоте 28 ГГц. Зона покрытия определена на участке от Манежной площади до Садового кольца [1]. Как отмечалось в прошлом разделе, «МТС» первыми развернули сети 5G в России для их тестирования в местах массового скопления людей. Базовые станции в основном располагаются на столбах освещения. Такие сети работают на частоте 4,9 ГГц и располагаются в парках имени Максима Горького, ВДНХ, «Ходынское поле», «Остров мечты», а также в районах МГУ, «Москва-Сити», «Сколково» и других местах. Всего насчитывается 14 зон 5G. Протестировать связь пилотной сети может каждый абонент компании при наличии смартфона, поддерживающего технологию 5G band n79.

Данные тестирования подтверждают, что скорость передачи данных в пилотных сетях достигает 1,5 Гбит/с, а временные задержки минимальны. Компания отмечает, что одновременно подключение к сети могут осуществлять тысячи абонентов. У абонентов появляется возможность в реальном времени загружать видео в формате 4K и запускать игры с облачных сервисов и пользоваться сервисами VR [3].

В 2021 году «МегаФон» запустил доступные для всех пользователей пилотные зоны 5G для тестирования в г. Санкт-Петербург. Компания сообщает, что зона покрытия является самой широкой в России, а сети не ограничены по числу подключаемых пользователей.

Для развертывания сети использовалось оборудование компании «Huawei», а развернута она на основе стандарта 4G в диапазоне миллиметровых длин волн.

Осенью 2021 года «МТС» сообщил, что в пилотной зоне города Москва скорость передачи на абонента достигла 5,6 Гбит/с. Также компания провела испытания антенн с технологией Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO), которые формируют множество фокусируемых на конкретных абонентов лучей, что позволяет увеличить зону покрытия сети, а также скорость передачи [3].

В конце 2021 года «Ростелеком» развернул первую сеть для тестирования оборудования поколения 5G в больнице имени С.П. Боткина в г. Москва. Планируется пилотирование новых технологий здравоохранения, мониторинг состояния пациентов и проведение обучения персонала с технологией VR. Отмечается, что скорость для одного устройства составит 4 Гбит/с [1].

#### **V. Отечественное оборудование для нового стандарта**

Планируется, что в ближайшем будущем базовые станции сетей пятого поколения будут строиться только на аппаратуре отечественного производства. При этом в компании «Ростех» уже в следующем году начнут выпуск такого оборудования. Сообщается, что это будет проводиться в рамках импортозамещения с целью предотвращения возможностей воздействия на системы связи в России извне. Согласно утвержденной дорожной карты производством оборудования будет заниматься «Ростех», а построением сетей связи «Ростелеком». По оценкам некоторых экспертов из-за полного перехода на российскую аппаратуру развитие 5G в России отодвинется на срок около года [4].



Производитель заявляет, что такая БС работает в LTE на частоте 450 МГц, при этом она может менять рабочий диапазон и перестраиваться на 5G, где поддерживает работу на частотах n77, 78 и 79.

## VI. Заключение

Работа по лицензированию частот под системы связи пятого поколения ведется широко. По состоянию на настоящее время ГКРЧ уже выдало лицензию на использование двухчастотных диапазонов. Объединение трех операторов связи в общую компанию «Новые цифровые решения» для продвижения 5G в России позволяет проводить большую работу с учетом интересов всех сторон.

Тестирование пилотных зон проводится в Москве и Санкт-Петербурге. Оценить самостоятельно преимущества нового стандарта может каждый абонент с технологией 5G на смартфоне. Пока что созданные сети связи для тестирования построены на оборудовании иностранных компаний, но заявления Правительства и ведущих корпораций позволяют с уверенностью сказать, что уже через несколько лет сети пятого поколения будут создаваться только на основе отечественных комплектующих. Это будет решать в первую очередь задачи в сфере безопасности нашей страны, а также уменьшит зависимость от отношений с зарубежными партнерами.

## Библиографический список

1. Развитие сетей 5G в России. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 01.12.2022).
2. Гурский С.М., Баев В.А., Дьяков А.В. Технологии мобильной связи пятого поколения: анализ и перспективы развития // СПБНТОРЭС: Труды ежегодной НТК г. Санкт-Петербург, 2020. С. 303-306.
3. Технологии SMARTСЕТИ. URL: <https://moskva.mts.ru/personal/podderzhka/zoniobslyzhivaniya/nasha-set?on=g5> (дата обращения: 14.12.2022).
4. Ростех. URL: <https://rostec.ru/> (дата обращения: 16.12.2022).
5. Вэнь Тонг, Пейин Чжу. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту. / пер. с англ. В. С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2022. 624 с.

*Дата поступления статьи: 31.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© В. О. Семина, И. Ю. Сагадеева, 2023

УДК 621.376

*Е. А. Сысолятин*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## МОДЕМ С ДВОЙНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО-ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

**Аннотация.** Недостатком модемов с двойной относительно-фазовой модуляцией является относительно сложный способ демодуляции. Для упрощения схемотехнической реализации

предложен способ двойной относительной фазовой модуляции, в котором одну квадратуру сигнала (например, синфазную) передают обычным способом, а вторую квадратуру сигнала (в этом случае ортогональную) дополнительно манипулируют в момент времени, соответствующий середине элемента, по фазе на  $180^0$  меандром.

**Ключевые слова:** квадратура сигнала, двойная относительно-фазовая модуляция (ДОФМ), деманипулятор.

### I. Введение

Способ двойной относительной фазовой модуляции, отличающийся от известных [1] тем, что в модуляторе на передающей стороне канала связи одна из квадратур сигнала, соответствующая одному из двух источников дискретного сообщения, дополнительно манипулируется в середине элемента по фазе на  $180^0$  меандром, который имеет период равный длительности элемента передаваемого сообщения и четные (или нечетные) фронты которого совпадают с фронтами этого элемента, а на приемной стороне канала связи в демодуляторе сигнал разветвляется и в одну из ветвей разветвления включается узкополосный фильтр основной избирательности, пропускающий на свой выход только одну не манипулированную дополнительно по фазе квадратуру сигнала, которая после фильтра подается для одного получателя сообщения на вход обычного демодулятора сигналов с относительной фазовой модуляцией, а на входе второй ветви разветвления включается деманипулятор фазы, который нивелирует во второй квадратуре сигнала, произведенное на передающей стороне канала связи меандром дополнительное изменение фазы на  $180^0$ , после чего этот сигнал подается на вход узкополосного фильтра основной избирательности, пропускающего на свой выход только вторую, ранее манипулированную по фазе на  $180^0$  квадратуру и не пропускающий первую квадратуру, получившую после деманипулятора фазы изменение фазы на  $180^0$  в центре каждого элемента, а после деманипулятора для второго получателя сообщения включается обычный демодулятор сигналов с относительной фазовой модуляцией, например, описанный в [3].

### II. Постановка задачи

Достижимый технический результат: упрощение схемотехнической реализации.

### III. Теория

Поясним вышеописанный алгоритм блок-схемой модулятора с двойной относительной фазовой модуляцией, изображенной на рис. 1.

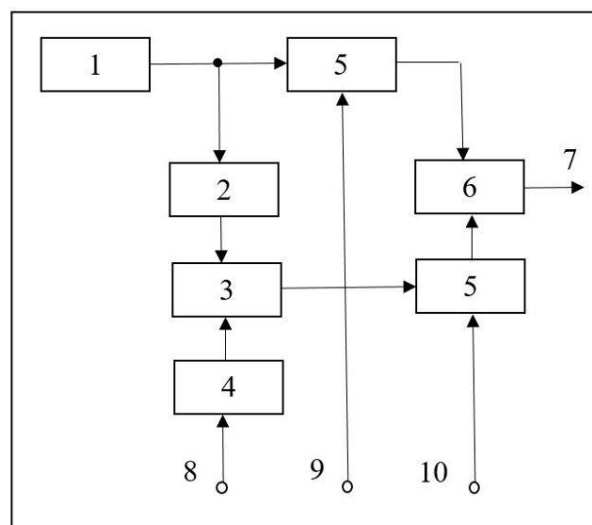


Рис. 1. Блок-схема модулятора с ДОФМ

На рис. 1 обозначено:

- 1 – генератор несущего гармонического колебания  $\cos(2\pi ft)$ ;
- 2 – фазовращатель несущего колебания на  $90^\circ$ ;
- 3 – манипулятор фазы;
- 4 – генератор биполярного напряжения «меандр»;
- 5 – модуляторы;
- 6 – сумматор квадратур несущего колебания;
- 7 – выход модулятора;
- 8 – вход от синхронизатора;
- 9 – вход от одного источника сообщений;
- 10 – вход от второго источника сообщений.

Генератор (1) формирует одну, например, синфазную квадратуру несущего колебания

$$u_c(t) = A \cos(2\pi ft + \varphi_0), \quad (1)$$

которая подаётся на фазовращатель (2), создающий вторую (в данном случае ортогональную) квадратуру несущего колебания

$$u_s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_0). \quad (2)$$

Синфазная квадратура поступает на модулятор (5). Манипулятор фазы (3) манипулирует фазу ортогональной квадратуры несущего колебания, при помощи генератора меандра (4). После манипулятора фазы (3) ортогональная квадратура поступает на модулятор (5). После модуляторов квадратуры суммируются на сумматоре (6) и поступают на выход модулятора (7) для дальнейшего преобразования по частоте в возбудителе передатчика и излучения с выхода передатчика в эфир.

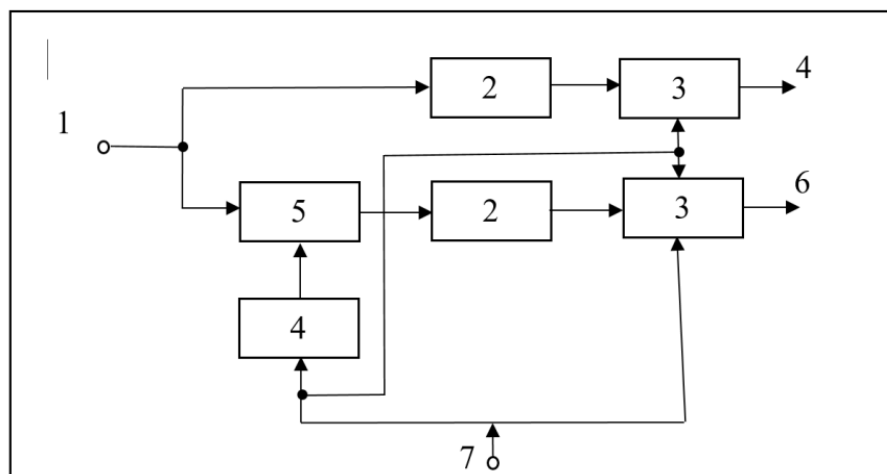


Рис. 2. Блок-схема демодулятора с ДОФМ

Рассмотрим блок-схему алгоритма демодулятора с ДОФМ, изображённую на рис.2.

На рис. 2 обозначено:

- 1 – вход демодулятора сигналов с ДОФМ;
- 2 – узкополосные фильтры;
- 3 – демодуляторы ОФМ сигнала;
- 4 – выход для первого получателя сообщения;
- 5 – деманипулятор фазы;
- 6 – выход для второго получателя сообщения;
- 7 – вход от синхронизатора.

На вход демодулятора поступает сигнал:

$$u_{\text{пр}}(t) = KUc1(t)A\cos(2\pi f(t-\Delta t) + \varphi_{\text{пр}}) + KU_m(t)Uc2(t)A\sin(2\pi f(t-\Delta t) + \varphi_{\text{пр}}) \quad (3)$$

где  $u_{\text{пр}}(t)$  – сигнал, с запаздыванием по времени  $\Delta t$ ,  $K$  – коэффициент передачи канала связи,  $Uc1(t)$  и  $Uc2(t)$  – манипулирующие сигналы,  $U_m(t)$  – напряжение меандра,  $A$  – амплитуда,  $\varphi_{\text{пр}}$  – фаза,  $2\pi f$  – угловая частота,  $t$  – время.

Далее, считая уровень помех во много раз меньшим уровня сигнала, будем помехами пренебрегать.

После поступления сигнала  $u_{\text{пр}}(t)$  на вход демодулятора (1) он разветвляется. В одну ветвь демодулятора включается узкополосный фильтр основной избирательности (2), пропускающий на свой выход только не манипулированную меандром синфазную квадратуру:

$$u_{\text{прс}}(t) = KUc1(t)A\cos(2\pi f(t-\Delta t) + \varphi_{\text{пр}}) \quad (4)$$

которая после фильтра подается на вход любого из известных демодуляторов сигналов с относительной фазовой модуляцией (3) (первая ветвь для первого получателя сообщения (4)). На входе второй ветви ставится деманипулятор фазы (5), который нивелирует производимое меандром в модуляторе на передающем конце канала связи изменение фазы в ортогональной квадратуре на  $180^\circ$ . После деманипулятора фазы (5) включается узкополосный фильтр (2), на выход которого проходит только ортогональная квадратура:

$$U_{\text{прс}}(t) = KUc2(t)A\sin(2\pi f(t-\Delta t) + \varphi_{\text{пр}}) \quad (5)$$

у которой ликвидирована дополнительная манипуляция фазы, произведенная на передающем конце радиолинии меандром. Синфазная же квадратура  $u_{\text{прс}}(t)$  приобретает после деманипулятора (5) изменение фазы в центре элементов сообщения на  $180^\circ$  и по этой причине не может пройти на выход узкополосного фильтра (2) во второй цепи демодулятора. Деманипулированная по фазе синфазная квадратура после узкополосного фильтра (2) подается на вход любого из известных демодуляторов сигналов с относительной фазовой модуляцией (3) (вторая ветвь для второго получателя сообщения (6)).

Описываемый способ двойной относительной фазовой модуляции имеет преимущество перед другими способами, так как использует более простой способ демодуляции.

Научный руководитель: проф., д.т.н., Хазан Виталий Львович, Омский государственный технический университет.

### Библиографический список

1. Петрович Н. Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией: монография. - Москва: Советское радио, 1965. С. 264.
2. Сартасов Н. А., Едвабный В. М., Грибин В. В. Коротковолновые приемные устройства: Москва: Связь, 1981. С. 287.
3. Пат. 2782450 Российская Федерация, МПК Н 04 L 1/08. Способ демодуляции сигналов с относительной фазовой манипуляцией / В.Л. Хазан, Е.А. Сысолятин; заявитель и патентообладатель ОмГТУ. - № 2021131408/07; заявл. 27.10.2021; опубл. 27.10.2022. // Бюл.№30.

*Дата поступления статьи: 29.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 05.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© Е. А. Сысолятин, 2023

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦРРЛ НА УЧАСТКЕ «ПЕТРОПАВЛОВСК - МАМЛЮТКА»**

**Аннотация.** В работе рассматривается проектирование цифровой радиорелейной линии на участке «Петропавловск – Мамлютка» на частоте 8 ГГц. Были выбраны оборудование радиорелейной вышки МИК-РЛ8Р и проведен расчет трассы с использованием программы ProfEdit. В процессе проектирования учитывались географические условия и особенности местности, а также проводились расчеты параметров просвета и ослабления сигнала. Полученные результаты гарантируют стабильное и надежное соединение между вышками на протяжении всего пролета. В работе были рассчитаны такие важные параметры РРЛ, как величина минимального просвета, величина относительного просвета, разность хода лучей и модуль множителя ослабления. Полученные значения оказались достаточными. В целом, данное исследование представляет собой полноценную работу по проектированию цифровой радиорелейной линии с учетом всех необходимых факторов и параметров на конкретном участке.

**Ключевые слова:** радиорелейная связь, диапазон 8 ГГц, выбор аппаратуры, проектирование профиля пролета.

### **I. Введение**

Линии радиорелейной связи являются ключевым элементом инфраструктуры современных телекоммуникационных систем, поскольку позволяют передавать информацию на большие расстояния с высокой скоростью и качеством. Эти линии также могут быть использованы в критических ситуациях, когда требуется быстрый и надежный обмен данными между различными объектами.

Применение таких линий в России имеет ряд преимуществ, особенно когда речь идет о необжитых территориях. При этом минимально необходимо дополнительных капиталовложений в развитие инфраструктуры вблизи центров передачи, приёма и обработки сигнала, потому что участки между ретрансляторами очень длинные. Кроме того, радиорелейные линии гораздо дешевле и проще в обслуживании, чем системы спутниковой связи.

Современные технологии производства телекоммуникационной аппаратуры и использование диапазонов частот свыше 10 ГГц существенно изменили оборудование и структуру радиорелейных линий [1]. Благодаря этому удалось значительно уменьшить габариты, вес и энергопотребление аппаратуры, а также повысить ее надежность.

Наиболее распространенным применением цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ) в настоящее время является использование их в качестве транспортных линий для внутризоновых и местных сельских сетей связи. Они должны связать все узлы связи сельских и внутриобластных городских населённых пунктов каждой зоны, включая узлы мобильной связи, и обеспечить им выход на областные (краевые, республиканские) узлы.

Таким образом, при выборе технологии построения линий для современных систем связи, определяющими факторами являются гибкость, надежность и легкость монтажа радиорелейных систем.

### **II. Особенности проектирования ЦРРЛ на 8 ГГц**

Современные радиорелейные линии (РРЛ) связи позволяют передавать различные типы информации на большие расстояния, включая телевизионные программы, телефонные сообщения, цифровые потоки и многое другое. Для таких потоков информации необходимы

широкие полосы частот, часто до нескольких десятков мегагерц, а также несущие в диапазоне гигагерц.

В настоящее время освоен весьма широкий диапазон рабочих частот для целей радиорелейной радиосвязи, начиная с диапазона 2 ГГц. Наиболее интересным же диапазоном ЦРРЛ является полоса частот от 7,9 ГГц до 8,4 ГГц [2].

Данный диапазон является достаточно развитым и хорошо освоенным в настоящее время. В нем работает большое количество радиорелейных систем средней емкости, а также аппаратура большой емкости, предназначенная для передачи потоков STM-1. Однако, на распространение сигнала в этом диапазоне начинают оказывать влияние гидрометеоры, такие как дождь, снег и туман, а также атмосферная рефракция, что может привести к закрытию трассы или к интерференции волн.

Средняя протяженность пролета РРЛ составляет 30–40 км, а антенны имеют высокий коэффициент усиления при диаметрах примерно 1,5–2,5 м [3]. В настоящее время диапазон 8 ГГц применяется для организации зонных линий связи и различных ответвлений от магистральных систем. Хотя число радиосредств в России, использующих этот диапазон, пока относительно невелико, необходимо учитывать помехи от соседних радиорелейных линий, работающих в данном диапазоне частот.

В настоящее время, как отечественные, так и зарубежные фирмы, освоили производство аппаратуры в диапазоне 8 ГГц и предлагают на рынке широкий спектр аналоговых и цифровых систем как средней, так и большой емкости. В целом, радиорелейная связь в данном диапазоне имеет свои преимущества и ограничения, и при проектировании трассы необходимо учитывать различные факторы, такие как климатические условия и помехи от соседних радиорелейных линий.

### III. Выбор оборудования

При проектировании трассы передачи информации важно учитывать несколько факторов, включая объем передаваемой информации, энергетические параметры оборудования, длину пролётов и климатические условия. Оптимальным выбором для такой трассы может стать использование среднескоростной цифровой радиорелейной линии (ЦРРЛ) на основе аппаратуры МИК-РЛ8Р+. В таблице 1 приведены основные параметры этой аппаратуры.

Преимуществом использования ЦРРЛ является то, что она обеспечивает высокую скорость передачи данных и может работать в широком диапазоне климатических условий. Кроме того, аппаратура МИК-РЛ8Р+ отличается высокой энергоэффективностью, что важно для снижения затрат на эксплуатацию и обслуживание.

Таблица 1

**Технические характеристики аппаратуры МИК-РЛ8Р+**

Рабочий диапазон частот, ГГц	7,9...8,4
Пропускная способность	STM-1
Полезная нагрузка	STM-1+Ethernet
Конфигурация системы 64 станций	1+0, 1+1, 2+0
Дуплексный разнос, МГц	266
Шаг перестройки частоты, кГц	250
Мощность передатчика, дБм	24
Тип модуляции	256-QAM
Разнос частот между стволами, МГц	3,5
Диаметр антенны, м	1,8
Коэффициент усиления антенны, дБи	41
Относительная нестабильность рабочих частот	$\pm 5 \times 10^{-6}$
Порог приёма при BER = 10 <sup>-6</sup> , дБм	-68

#### IV. Расчет трассы

Для проведения расчетов профиля пролета "Петропавловск - Мамлютка" на частоте 8 ГГц, я использовал программу ProfEdit и данные о технических параметрах аппаратуры цифровой радиорелейной вышки из таблицы 1. В процессе работы учитывались различные факторы, включая географические условия и особенности местности. Я выбрал высоту установки антенн в 55 м и 45 м для первой и второй вышек соответственно, чтобы гарантировать стабильное и надежное соединение между ними на протяжении всего пролета. Таким образом, мною в процессе проектирования профиля пролета были учтены актуальные данные об аппаратуре и условиях местности.

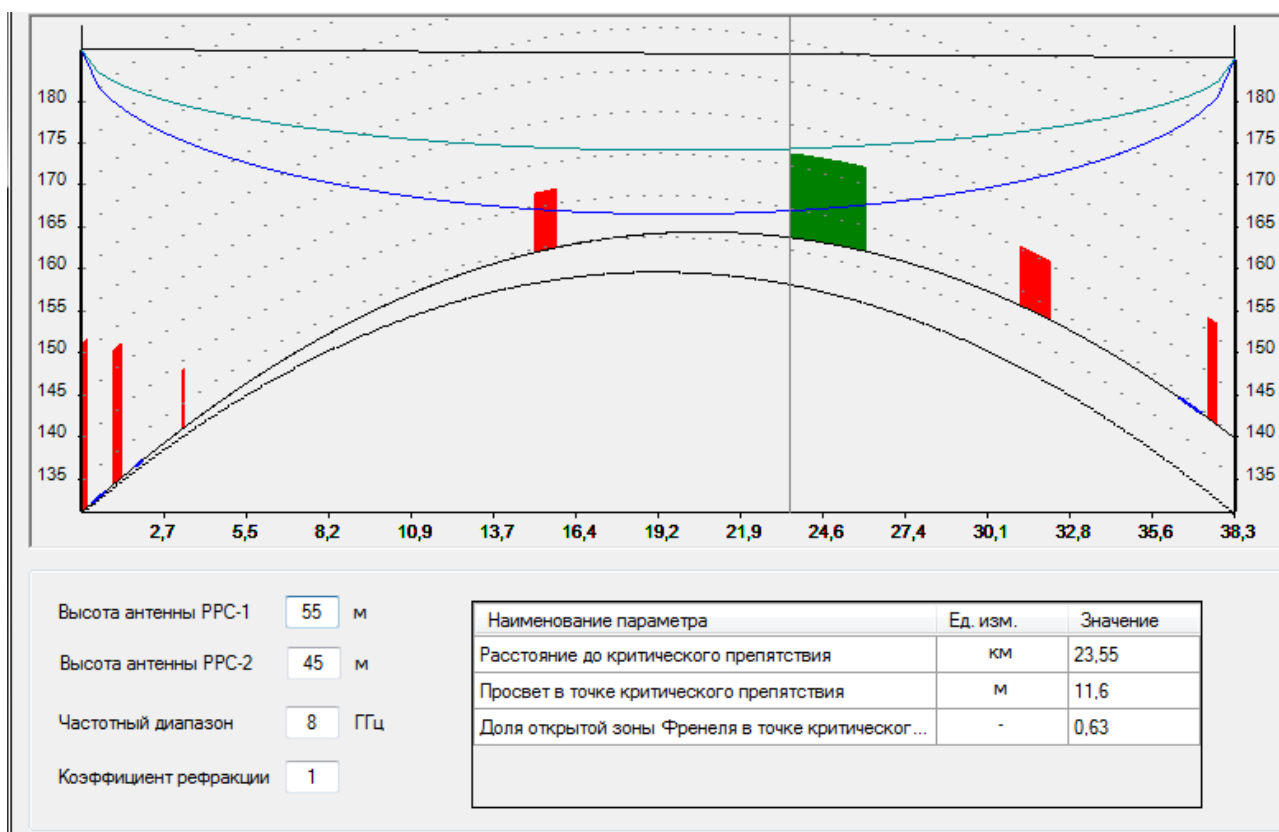


Рис. 1. Профиль пролёта «Петропавловск - Мамлютка» при работе на частоте 8 ГГц

Величина минимального просвета была вычислена по формуле:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} R_0 \lambda k (1 - k)}, \quad (1)$$

где  $k = \frac{R_1}{R_0}$  – относительная координата наивысшей точки профиля пролёта,  $R_1$  – расстояние до критического объекта, а  $R_0$  – длина пролета трассы,  $\lambda$  – длина волны.

Величина относительного просвета была вычислена по формуле:

$$p = \frac{H}{H_0} \quad (2)$$

где  $H$  – просвет в точке критического препятствия,  $H_0$  – величина минимального просвета.

Разность хода прямого и отражённого лучей  $\Delta r$  можно определить из геометрии профиля пролёта:

$$\Delta r = \frac{H^2}{2R_0 k(1 - k)}, \quad (3)$$

Так как  $H > H_0$  и  $p > 1$ , то пролёт между станциями считается открытым. Исходя из этого определим, разность хода лучей и модуль множителя ослабления. Модуль коэффициента отражения возьмём равным  $|\Phi| = 0,95$ .

Множитель ослабления при наличии прямой видимости между антеннами на пролёте был определен по формуле:

$$|V| = \sqrt{1 + |\Phi|^2 + 2|\Phi| \left( \frac{\pi p^2}{3} \right)}, \quad (4)$$

где  $|\Phi|$ ,  $\psi_\Phi$  – модуль и фаза коэффициента отражения от земной поверхности;

Расчитанные параметры проектируемой трассы представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Расчитанные показатели трассы ЦРРЛ «Петропавловск - Мамлютка»**

Величина минимального просвета, м	10,639
Величина относительного просвета, м	1,09
Разность хода лучей	0,007429
Модуль множителя ослабления	2,066

Расчитанные параметры проектируемой трассы оказались достаточными и последующие расчеты показали, что связь является устойчивой, поскольку полученное значение SESR (0,000035%) оказалось меньше требуемого SESR для местных сетей длиной 50 км, которое равно 0,01%. Расчёты показали, что на проектируемой ЦРРЛ обеспечивается требуемое качество связи без применения резервирования в соответствии с рекомендациями ВСС РФ.

### **V. Заключение**

В результате проведенного проектирования ЦРРЛ на участке «Петропавловск - Мамлютка» были рассмотрены особенности проектирования на частоте 8 ГГц, выбрано оборудование радиорелейной вышки МИК-РЛ8Р и проведен расчет трассы, включающий в себя проектирование профиля пролета в программе ProfEdit и расчет параметров просвета и ослабления сигнала. Важным результатом является определение необходимых характеристик и параметров для создания надежной и эффективной ЦРРЛ связи на данном участке.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Лутченко Сергей Святославович, Омский государственный технический университет.

### **Библиографический список**

1. Быховский М. А., Кирик Ю. М., Носов В. И. и др. Основы проектирования цифровых радиорелейных линий связи. Уч. пособие для вузов под ред. профессора М.А. Быховского. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 332 с.
2. ГОСТ Р 53363 – 2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчёта. М.: Стандартинформ, 2010 – 34 с.



3. Садовомский А. С., Гульшин В. А. Расчёт радиорелейных линий (РРЛ) связи. Методические указания по курсовому проектированию. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 28 с.

*Дата поступления статьи: 28.03.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 03.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Усаченко, 2023

УДК 621.592.0

*С. С. Хомушку*

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия

### **ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ**

**Аннотация.** В работе рассмотрены последние достижения в области волоконно-оптических датчиков на основе бриллюэновского рассеяния. Волоконно-оптические датчики на основе бриллюэновского рассеяния находят свое применение во многих оптоэлектронных устройствах. Стимулированное Бриллюэновское рассеяние (СБР) является основным фактором, ограничивающим максимальную выходную мощность оптического волокна в узкополосных приложениях, к которым относятся важные области пассивной передачи данных. Выходная мощность оптического волокна в узкополосных приложениях, которые включают в себя такие важные области, как пассивные оптические сети (PON – Passive Optical Network), мощные волоконные усилители и лазеры. Большие усилия были направлены подавлению эффекта стимулированного бриллюэновского рассеяния SBS (SBS – Stimulated Brillouin Scattering) и увеличению максимальной выходной мощности оптического волокна. СБР в оптическом волокне описывает взаимодействие электромагнитного поля (фотона) с характерным изменением плотности волокна. Когда амплитуда электрического поля оптического пучка (так называемая волна накачки), а другая волна вводится на пониженной частоте Бриллюэна (а именно волна Стокса), биение между волнами накачки и Стокса создает модифицированное изменение плотности через электрострикционный эффект, что приводит к так называемому стимулированному рассеянию Бриллюэна. Изменение плотности связано с механической акустической волной; и на него могут влиять локальная температура, деформация и вибрация, которые вызывают изменения в эффективном коэффициенте преломления волокна показателя преломления и скорости звука. Посредством измерения статических или динамических изменений частоты Бриллюэна вдоль волокна можно реализовать распределенный волоконный датчик для локальной температуры, деформации и вибрации на десятки и сотни километров. В данной статье рассматривается прогресс в улучшении такого параметра работы датчика, как пространственное разрешение, также будет рассмотрен сам принцип работы волоконно-оптических датчиков на основе Бриллюэновского рассеяния. Эти виды датчиков могут быть использованы в гражданском структурном мониторинге трубопроводов, мостов, плотин и железных дорог. для предотвращения катастроф. По аналогии со статической решеткой Брэгга, можно написать движущуюся решетку Бриллюэна в волокне со временем жизни акустической волны. Длина решетки Бриллюэна может контролироваться импульсами

записи в любом положении в волокне. Такие решетки можно использовать для измерения изменений двулучепреломления, которое является важным параметром в волоконно-оптических коммуникациях. Применения для такого рода датчиков можно найти в аэрокосмической отрасли, обработке материалов и тонких структурах.

**Ключевые слова:** рассеяние бриллюэна (Brillouin scattering), волоконно-оптические датчики, принципы устройства волоконно-оптических датчиков бриллюэна (Principles of construction of Brillouin fiber-optic sensors), дифференциальный широтно-импульсный парный бриллюэновский оптический анализ временной области (DPP-BOTDA-Differential Pulse-width Pair Brillouin Optical Time-domain Analysis), оптического дифференциального параметрического усиления (ODPA- Optical Differential Parametric Amplification).

## I. Введение

Бриллюэновское рассеяние - это тип неупругого рассеяния, теоретические основы которого были впервые изложены Бриллюэном примерно в 1922 году. В этом процессе падающая световая волна преобразуется в рассеянный свет и акустическую волну. Рассеянная волна понижается по частоте. Только после развития интерферометрических методов и изобретения лазеров наблюдалось явление SBS (Stimulated Brillouin Scattering). В 1964 году Гармир Э. и Таунс Ч. экспериментально продемонстрировали SBS в твердых телах. В эксперименте интенсивный лазерный луч фокусировался на кристалл и было обнаружено когерентное усиление рассеянного света. Было установлено, что механизм SBS обусловлен электрострикцией. После демонстрации SBS в этой области было проделано много работы. SBS успешно нашла применение в различных областях: бриллюэновские усилители, бриллюэновские лазеры, фазовое сопряжение, объединение пучков, сжатие импульсов, задержки импульсов и многие другие. В некоторых областях, однако, SBS считается нежелательным, особенно в тех случаях, когда необходимо передавать мощный свет с узкой шириной лазерной линии, который должен быть доставлен через оптическое волокно. К таким областям включают передачу PON, мощные волоконные лазеры и усилители. Схема PON (Passive Optical Network) показана на рис. 1. При использовании PON свет, кодированный сигналом передается на расстояние 10 км, чтобы достичь терминала оптической линии (OLT-Optical Line Terminal). Сплиттеры используются для того, чтобы каждый оптический сетевой блок (ONU - Optical Network Terminal) мог принимать сигнал. Для того чтобы PON мог охватить большее количество ONU, бюджет мощности является ключевым фактором, ограничением которого является SBS.

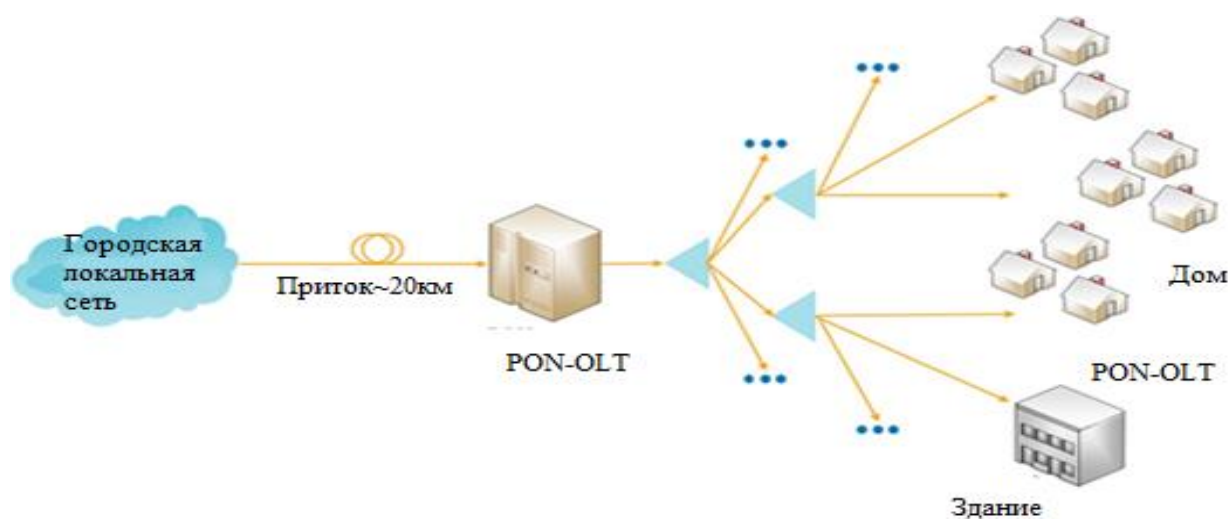


Рис. 1. Принципиальная схема PON

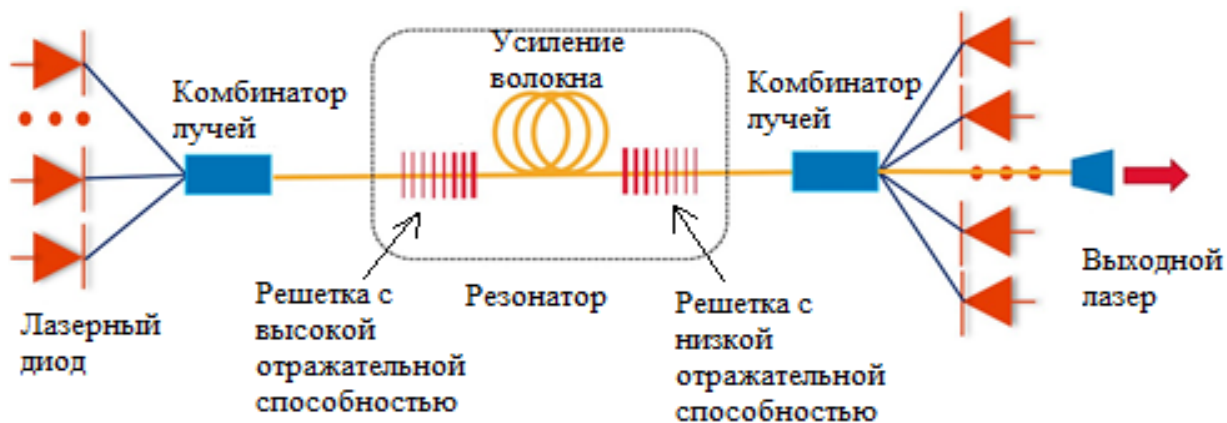


Рис. 2. Типовая схема мощного волоконного лазера

На рис. 2 показана схема одного из типов мощных волоконных лазеров: несколько лазерных диодов (LD-Light-Emitting Diode) используются в качестве лампы накачки. Для достижения высокой выходной мощности лазера необходимо подавить SBS. Уже более двух десятилетий распределенные волоконно-оптические датчики на основе бриллюэновского рассеяния вызывают значительный интерес благодаря своей способности контролировать температуру и деформацию. Стимулированное бриллюэновское рассеяние усиливает такое рассеяние в бриллюэновском оптическом анализе временной области (BOTDA-Brillouin Optical Time Domain Analyzer) с интенсивным сигналом и лучшее пространственное разрешение по сравнению со спонтанным рассеянием, основанным на Бриллюэновской оптической временной доменной рефлектометрии (BOTDR-Optical Time Domain Reflectometr). Наибольшая мощность волны накачки ограничивается нелинейным эффектом в волокне.

## II. Распределенные волоконно-оптические датчики на основе бриллюэновского рассеяния

В этом разделе объясняется концепция распределенных датчиков на основе бриллюэновского рассеяния и наилучшая производительность распределенного датчика на основе бриллюэновского рассеяния при ограничении времени релаксации акустической волны. Распределенный волоконно-оптический датчик на основе бриллюэновского рассеяния использует взаимодействие света с акустическими фононами, распространяющимися в сердцевине волокна. Бриллюэновский рассеянный свет имеет сдвиг частоты, пропорциональный локальной скорости акустических фононов (также называемых акустическими волнами), которая зависит от локальной плотности и напряжения стекла и, следовательно, от температуры и деформации материала. Этот бриллюэновский сдвиг частоты составляет порядка 9-13 ГГц для длин волн излучения 1,3-1,6 мкм в стандартных одномодовых волокнах и он приблизительно определяется следующим образом:

$$v_b(z) = \frac{2n_{эфф}(z)V_a}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $n_{эфф}$  – эффективный модовый коэффициент преломления волокна,  $z$  – расстояние,  $V_a$  – скорость звука в стекле, а  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве.

Возможность определения этого явления рассеяния возникает при измерении зависимости распределенного бриллюэновского сдвига частоты от деформации и температуры. Концепция использования бриллюэновского рассеяния в волокне для оптического зондирования была впервые предложена в 1989 году и была названа Бриллюэновским оптическим анализом временной области (BOTDA) с использованием

волнового метода зонда – насоса. Этот базовый подход включает в себя запуск короткого импульса накачки в один конец тестового волокна и зондирующий луч непрерывной волны в другой конец.

### **III. Улучшение пространственного разрешения путем предварительной накачки акустической волны**

В последние годы большое внимание уделяется улучшению пространственного разрешения, и было предложено несколько новых методов. Среди этих методов существует один общий принцип работы – предварительное возбуждение. В этом методе предварительно активированное акустическое поле создается посредством электрострикции через интерференцию непрерывной волны накачки (или импульса большой длительности) и встречно распространяющейся непрерывной сигнальной волны, имеющей локально согласованный сдвиг частоты Бриллюэна по отношению к волне накачки. Когда акустическая волна развивается с естественной шириной линии Бриллюэна, приходит очень короткий импульс и берет образец созданной эффектом электрострикции акустическую волну в узкой линейной ширине. Таким образом, сигнал Стокса намного сильнее, чем его усиленная часть, генерируемая взаимодействием короткого импульса с CW (Continuous Wave) -накачкой. Были продемонстрированы пространственные разрешения в сантиметрах с высоким деформационным или температурным разрешением. Хотя предварительная накачка усиливает акустическую волну, она вызывает минимальный сдвиг частоты Бриллюэна для небольшого участка с изменением температуры или деформации, которая должна быть эквивалентна по крайней мере 1/2 ширине спектра Бриллюэна, поскольку интенсивность неизмененного участка напряжения или температуры намного больше, чем интенсивность измененного участка напряжения или температуры, при 1550 нм она составляет 10 МГц, что эквивалентно 200 микродеформациям, если только не используется темная основа, которая устраняет эффекты обеднения, вызванные предварительной накачкой через обратный фон импульса. Этот подход позволяет получить высокое частотное и пространственное разрешение при больших длинах зондирования. Однако длительность времени темной базы зависит от длины чувствительного волокна и ширины импульса. Это означает, что необходимо проверить длительность темной базы для каждой разной длины чувствительности и пространственного разрешения. Это делает реализацию данной техники в полевых условиях затруднительной.

Совсем недавно был предложен дифференциальный широтно-импульсный парный бриллюэновский оптический анализ временной области (DPP-BOTDA) для зондирования с высоким пространственным разрешением. По-прежнему используя идею предварительной накачки для измерения дифференциального сигнала усиления Бриллюэна вместо самого усиления Бриллюэна. Этот метод использует два различных импульса почти одинаковой длительности, с высоким коэффициентом подавления 40-50 децибел для устранения эффекта предварительного постоянного тока. Два отдельных измерения реализованы в отношении отдельных импульсов и дифференциального сигнала усиления Бриллюэна, затем получается путем вычитания двух сигналов Бриллюэна. Дифференциальная техника может быть реализована двумя методами: фазовый сдвиг пары импульсов и дифференциальной широтно-импульсной парой.

Идея фазового сдвига импульса добавляется к нефазовому сдвинутому импульсу, аналогична идее добавления яркого импульса к темной базе, что представляет собой модуляцию интенсивности, а не фазовую модуляцию. В паре фазово сдвинутых импульсов два импульса имеют одинаковую ширину импульса, за исключением того, что последняя часть второго импульса инвертирована по фазе второго импульса (фазовый сдвиг). В результате пространственное разрешение ограничено временем спада модуляции накачки и фазовым сдвигом. Время спада модуляции накачки и явление вторичных сигналов "эхо", как

было предложено ранее. С другой стороны, дифференциальная широтно-импульсная пара просто использует два импульса с разными длительностями ширины импульса. Оба метода продемонстрировали возможность достижения высокого пространственного разрешения и дальнего действия зондирования, однако пара импульсов со сдвигом фазы дает улучшение сигнала на 3 децибела ценой сложного процесса восстановления данных из-за сложного спектра Бриллюэна, создаваемого двумя последовательными импульсами с разной фазой.

Наилучшие показатели системы дифференциального усиления сигнала Бриллюэна были получены при длине зондирования 2 км с пространственным разрешением 2 см, для разрешения бриллюэновского сдвига частоты 2 МГц, что эквивалентно 2 °С температурного разрешения. Для больших длин зондирования примеры производительности включают 30 см. Пространственное разрешение при длине зондирования 25 км с точностью сдвига частоты Бриллюэна в 1 МГц и точностью 0,3 Мегагерц при пространственном разрешении 1 метр на длине зондирования 12 километров. В то время как наилучшие результаты при использовании метода эхо Бриллюэна (фазовый сдвиг) были получены при длине зондирования 5 километров, длина зондирования 5 километров с пространственным разрешением 5 сантиметров и сдвигом частоты Бриллюэна 3 Мегагерца.

#### **IV. Заключение**

В данной работе были рассмотрены методы улучшения параметров работы датчика, улучшение пространственного разрешения, а именно дифференциальный широтно-импульсный парный бриллюэновский оптический анализ временной области (DPP-BOTDA) и дифференциальная техника. Дальнейшее изучение технологии DPP-BOTDA требует ее реализации в оптической области поля на основе когерентного взаимодействия бриллюэновского усиления и потерь с помощью оптического дифференциального параметрического усиления (ODPA). Поскольку в DPP-BOTDA усиление и потери не являются бриллюэновскими, ODPA обеспечивает комбинированный процесс бриллюэновского усиления и потерь с двумя акустическими волнами, создаваемыми как несущей и стоксовой, и несущей и антистоксовой волнами. Поскольку одна и та же несущая волна участвует в процессах генерации волн на пониженных частотах Бриллюэна (волны Стокса и анти-Стокса), несущая волна "видит" фазовые сдвиги от процессов "усиления" и "потери", и обе усиленные акустические волны испытывают интерференцию. Таким образом, возникает суженный параметрический спектр усиления Бриллюэна.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Горлов Николай Ильич, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия.

#### **Библиографический список**

1. Xiayoi B., Liang C. Recent progress in brillouin scattering based fiber sensors //Sensors Journal. 2011. Vol. 11. no. 4. P. 4152-4187. DOI:10.3390/s110404152
2. Bin H., Jiaqi W., Xiaopeng S. Fiber-based techniques to suppress stimulated brillouin scattering//Fotonics Journal. 2023. Vol. 10. no. 3. P. 282. DOI:10.3390/photronics10030282

*Дата поступления статьи: 03.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 24.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© С. С. Хомушку, 2023

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ «SINCNET» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО ГОЛОСУ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены существующие архитектуры нейронных сетей, с помощью которых можно улучшить показатели систем идентификации по голосу. Выполнен сравнительный анализ скорости обучения и процента валидации трёх видов архитектур. Исследованы параметры и особенности алгоритма обучения нейронной сети «SincNet». Предложены варианты применения нейронной сети «SincNet», использующей набор полосовых фильтров заранее заданной формы.

**Ключевые слова:** идентификация, биометрия, нейронная сеть, звуковой сигнал.

### **I. Введение**

Идентификация личности по голосовым данным может использоваться в различных областях, включая системы аутентификации для доступа к конфиденциальной информации, автоматизированные системы обработки операторских вызовов и т. д. Системы голосовой идентификации показывают хорошие статистические показатели распознавания личности. Однако есть и проблемы при проведении идентификации говорящего. Они могут проявляться в неполной или неточной идентификации голосового образца человека. Это может быть вызвано различными причинами:

- Особенности самого голосового образца человека, такие как высокий или низкий тембр голоса, наличие акцента или диалекта.
- Недостаточная точность идентификации, вызванная техническими проблемами или ограничениями в использовании различных методов идентификации.
- Влияние внешних факторов, таких как эмоциональное состояние человека, его здоровье и возраст, которые могут повлиять на голосовой образец и усложнить его идентификацию.

Проблема идентификации по голосу остается актуальной и требует более точных и надежных методов и технологий для решения. Нейронные сети могут решить проблемы точности идентификации личности по голосу. Они имеют большую вычислительную мощность и могут обработать большое количество данных, что позволяет им эффективно анализировать голосовые данные и определять уникальные характеристики голоса человека.

### **II. Существующие архитектуры нейронных сетей для решения задач идентификации по голосу**

CNN (Standard Convolutional Neural Network – стандартная сверточная нейронная сеть) – архитектура нейронных сетей, использующаяся для обработки «сырых» образцов речи. Разделения весов, локальные фильтры и объединение фильтров в «пулы» помогают нейронной сети находить надежные и инвариантные представления звуковых сигналов [1]. Особенностью является то, что форма входного сигнала напрямую подключается к случайно инициализированному сверточному слою, который пытается изучить особенности и захватить характеристики из необработанных аудиокадров [2].

«ConstantSincLayer» – архитектура нейронных сетей, в которой первый сверточный слой в стандартной CNN заменяется постоянным слоем. Слой свертывает входные сигналы с помощью банка фильтров с фиксированной полосой пропускания (полосовых фильтров).

Частоты полосовых фильтров расположены линейно по шкале субъективного восприятия тонов [2].

«SincNetLayer» – сверточная нейронная сеть, которая эффективно изучает индивидуальные полосовые фильтры с помощью обучаемых функций. Уровень «SincNet» свертывает входные сигналы с помощью банка полосовых фильтров и затем изучает лучшие параметры для этих полосовых фильтров в рамках нейронной сети [2].

Все перечисленные виды архитектур нейронных сетей направлены на поиск и выделение наиболее характерных частот в анализируемом акустическом сигнале. Но основное различие заключается в том, что в первом свёрточном слое сети «SincNet» содержится информация о представлении фильтра, а стандартная сверточная нейронная сеть должна подобрать необходимую форму фильтра самостоятельно.

### III. Сравнительный анализ характеристик

С помощью платформы «MATLAB» и её инструментов для анализа звуковых сигналов «Audio Toolbox» и реализации машинного обучения «Deep Learning Toolbox» был изучен пример реализации голосовой идентификации с использованием нейронных сетей.

Для осуществления обучения нейронных сетей был использован открытый набор данных «train-clean-100» из библиотеки «LibriSpeech» [3]. Датасет состоит из массива английской речи, полученной из аудиокниг проекта «LibriVox». Частота дискретизации датасета составляет 16 кГц. Для анализа характеристик был инициирован запуск обучения нейросетей.

Из данных, представленных на рис. 1–3, можно сделать вывод, что стандартная свёрточная сеть не обеспечивает постоянный уровень надежности. В зависимости от выборки данных точность валидации изменяется в диапазоне от 78% до 84%. «SincNetLayer» позволяет нормализовать точность валидации и облегчить обучаемость нейросети, точность колеблется в пределах 1%, но составляет порядка 75%. «SincNet» же показывает стабильные 81% независимо от выборки данных. Когда выборка не такая большая, классический подход позволяет подобрать характеристики фильтров некоей «причудливой» формы, которая не столько отражает закономерности голоса говорящего, сколько просто адаптируется под конкретные примеры. Однако при увеличении выборки начинаются проблемы с подбором характеристики.

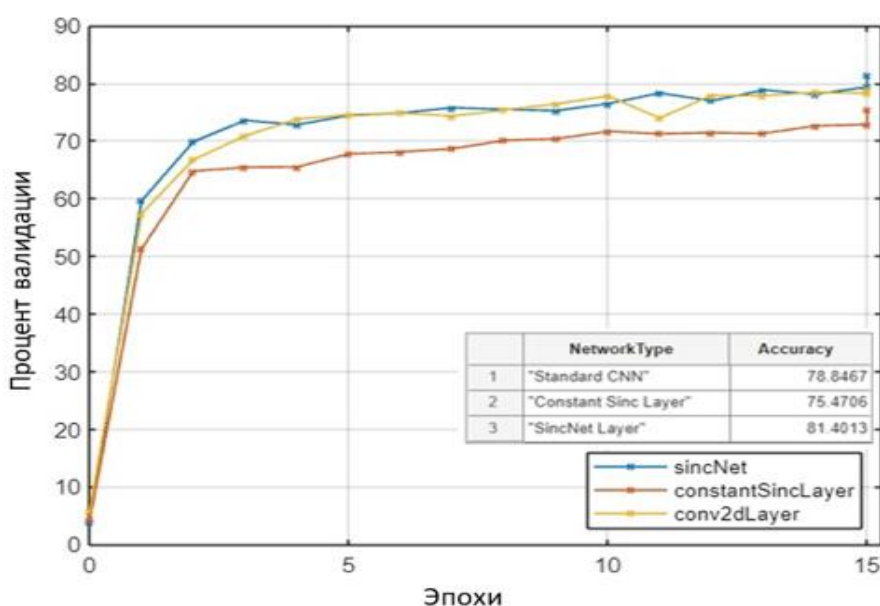


Рис. 1. Сводка результатов первого запуска обучения



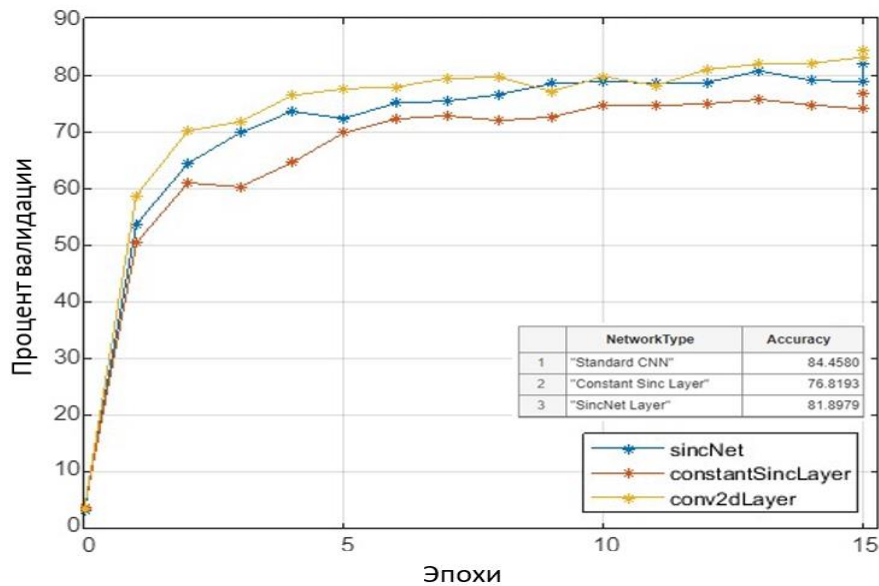


Рис. 2. Сводка результатов второго запуска обучения

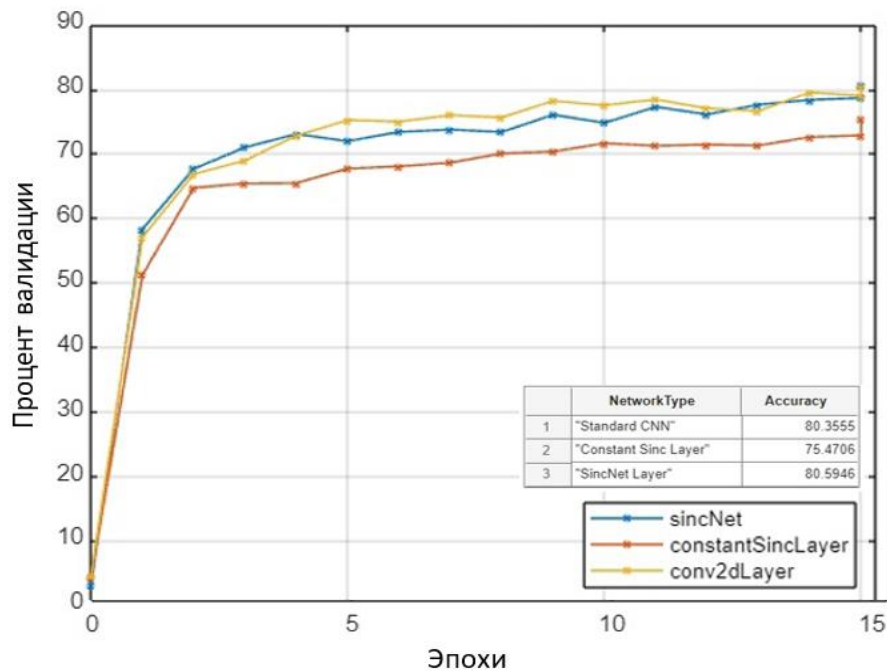


Рис. 3. Сводка результатов третьего запуска обучения

Также по результатам исследования обучаемости нейронной сети можно оценить данные скорости обучения. «SincNetLayer» показывает наилучшие показатели (170 мин) в этом отношении за счёт удобства соотнесения входных голосовых сигналов с имеющимся банком фильтров, однако за счёт стандартизации теряется учёт индивидуальности параметров голоса и происходит снижения процента валидации. У стандартной свёрточной сети и «SincNetLayer» параметры скорости схожи (228 и 227 мин), однако при оценке работоспособности стоит ориентироваться на надёжность идентификации.

#### IV. Исследование особенностей алгоритма «SincNet»

Эта сеть отличается от классических сверточных сетей тем, что использует фильтры, настроенные на частоту, а не на временной домен. Это позволяет «SincNet» более эффективно работать с аудиоданными, которые имеют различную частотную структуру.



При сравнении рис. 4 и рис. 5 очевидна разница в подборе фильтров. Так для реализации подбора фильтра стандартной нейронной сети требуется 256 параметров, «ConstantSincLayer» – 9 параметров, «SincNet» – 18. Чем больше подбираемых параметров – тем больше их неопределенность в вероятностном смысле и, как следствие, ниже уровень валидации.

Из данных рис. 6 можно определить преимущества метода «SincNet»: меньшее число параметров, более быстрый расчёт фильтра из-за симметричности свёртки, быстрая сходимость, хорошая интерпретируемость, более высокий процент валидации.

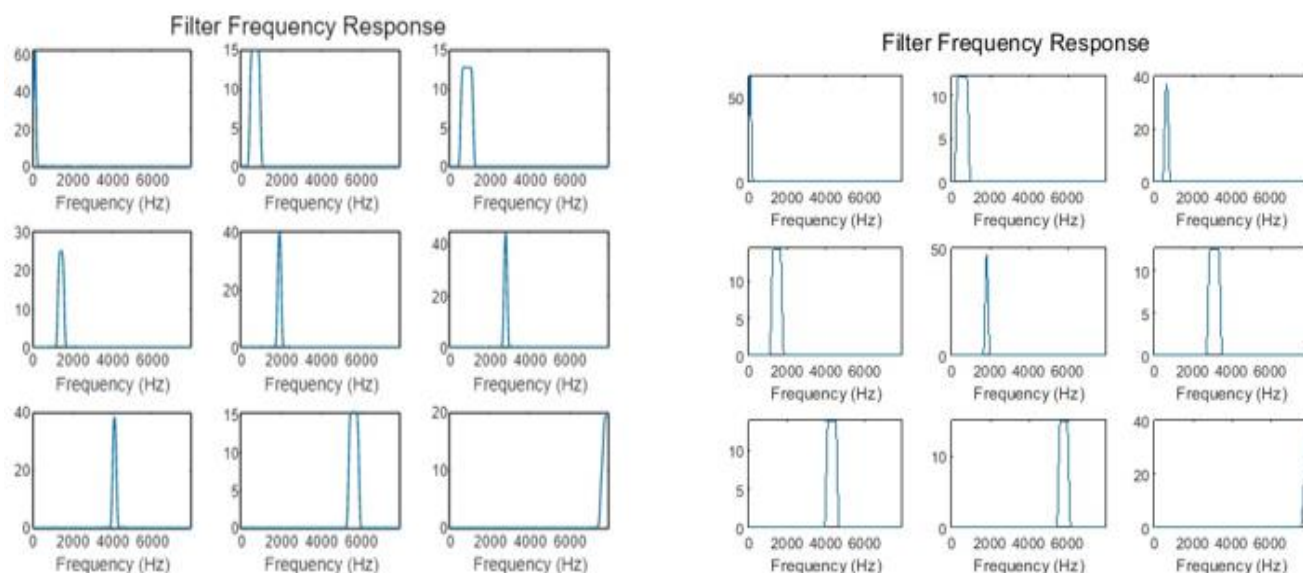


Рис. 4. АХЧ фильтров для нейронной сети «SincNet»

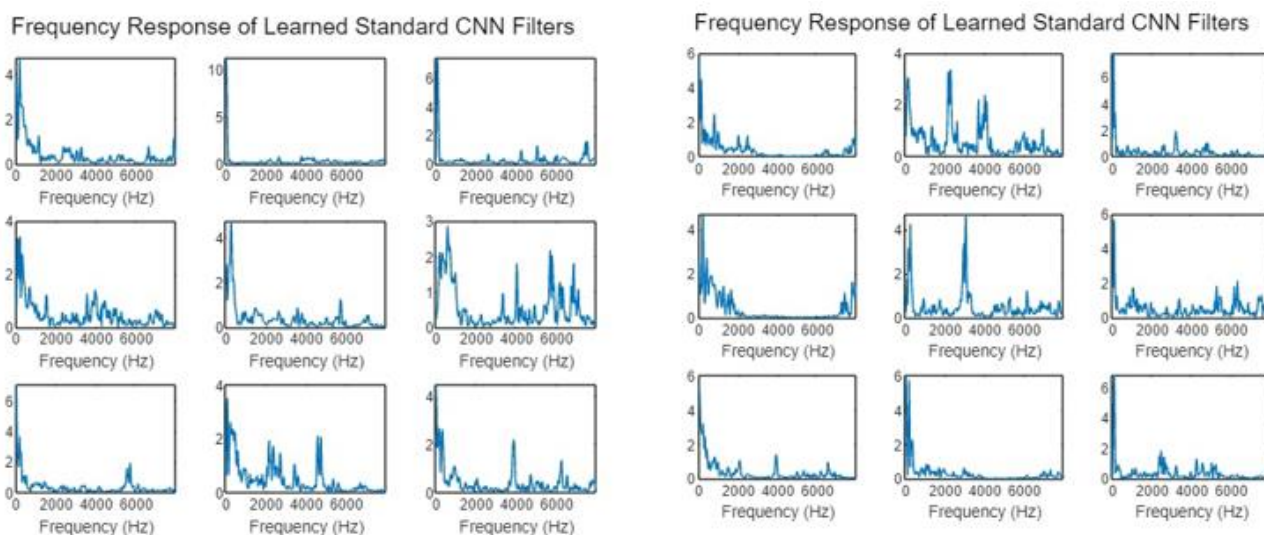


Рис. 5. АХЧ фильтров для нейронной сети CNN

Можно заметить, что в процессе обучения нейронной сети данные датасета разбиваются в процентном соотношении: 80% аудиофайлов назначены обучающему набору, а 20% – тестовому набору. Тестовый набор для проверки точности валидации в методе «SincNet» всегда формируется случайным образом. Использование вариативности метода обучения позволяет «SincNet» подтвердить своё преимущество показателя валидации по сравнению с другими методами.

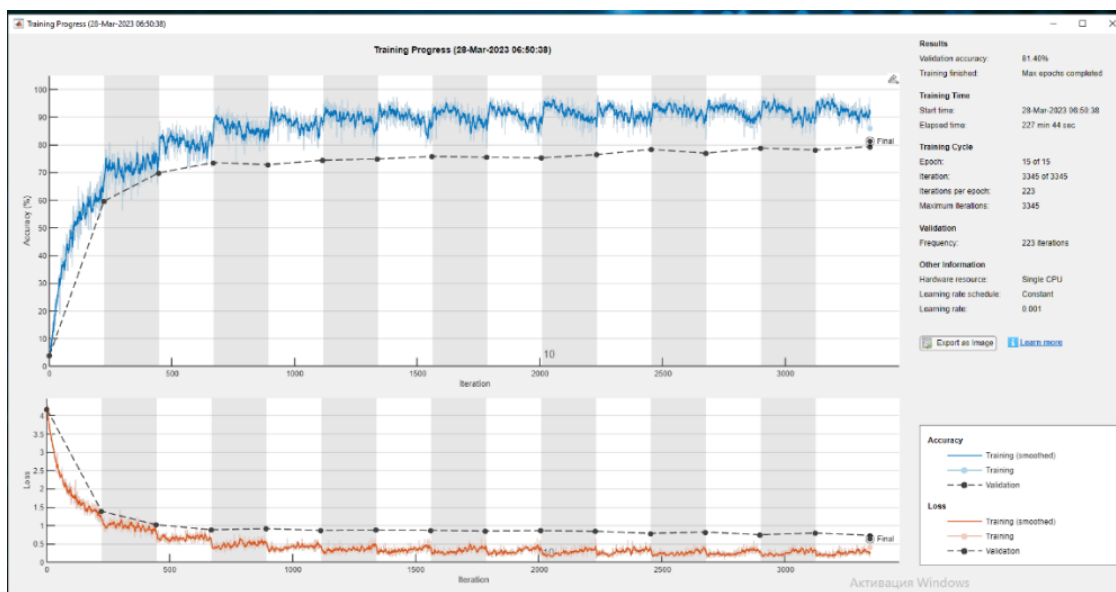


Рис. 6. Данные процесса обучений нейронной сети «SincNet» после первого запуска

## V. Заключение

Архитектура нейронной сети «SincNet» позволяет решать задачи идентификации по голосу более эффективно и точно, чем традиционные подходы. «SincNet» основана на сверточных нейронных сетях, которые имеют меньше параметров и лучше адаптируются к различным языковым условиям.

Синхронные фильтры, использованные в архитектуре «SincNet», эффективно извлекают спектральные характеристики речи, что делает ее более устойчивой к различным искажениям, таким как шум, изменение скорости или тоновой высоты голоса.

Поэтому, применение архитектуры нейронной сети «SincNet» в задачах идентификации по голосу представляет большой потенциал. Она может быть использована для создания систем биометрической идентификации, систем аутентификации пользователей в голосовых интерфейсах, систем распознавания голосовых команд.

Научный руководитель: доц., к.т.н., Ионов Антон Борисович, Омский государственный технический университет.

## Библиографический список

1. Ravanelli M., Bengio Y. Speech and speaker recognition from raw waveform with «SincNet». URL.: <https://goo.su/ExET> (дата обращения: 23.04.2023).
2. Статья MATLAB. Идентификация спикера с использованием пользовательского уровня «SincNet» и глубокого обучения. URL: <https://goo.su/u0n2> (дата обращения: 23.04.2023).
3. Panayotov V., Chen G., Povey D. and Khudanpur S. Librispeech: An ASR corpus based on public domain audio books. URL.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7178964> (дата обращения: 23.04.2023).

Дата поступления статьи: 03.04.2023

Дата одобрения после рецензирования: 12.04.2023

Дата принятия к публикации: 19.06.23

© А. Н. Штоль, 2023

## **КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ИХ РОЛЬ В СРЕДСТВАХ СВЯЗИ**

**Аннотация.** На сегодняшний день существуют различные методы для улучшения корреляционных свойств процедуры синхронизации, а именно коды Баркера,  $m$ -последовательности,  $l$ чм-последовательности, импульсные фазокодированные последовательности, многофазные последовательности. Для выполнения задач по электромагнитной совместимости и повышения помехоустойчивости в условиях ограниченного, постоянно забитого частотного фона необходимо обеспечить наилучшее отношения главного пика к боковым лепесткам автокорреляционная функция (АКФ). В данной работе предлагается рассмотреть существующие решение по улучшению корреляционных свойств синхросигнала, а также продемонстрировать результаты моделирования комплексных последовательностей, как альтернативу уже сформированных методов по решению насущных задач.

**Ключевые слова:** идеальная автокорреляционная функция (АКФ),  $m$ -последовательности, кодовое разделение каналов, комплексные последовательности.

### **I. Введение**

Потребность в обработке и передачи данных в реальном времени требует разработки надежных и эффективных каналов связи, способных обрабатывать большие объёмы данных без задержки и потерь. Однако с возрастающей сложностью радиолокационных систем возникают новые проблемы. Например, постоянно используемые частоты для различных диапазонов связи перенасыщаются устройствами из-за типовых решений проектирования радиотехнических устройств, ввиду этого требуется постоянный поиск новых методов и средств для обеспечения должно качества связи в особо жестких и специфичных условиях.

Одним из критериев качественного канала связи является синхронизация. Данная задача сводится к обеспечению наиболее простого сопоставления корреляционной функции на входе приемного устройства. Далее будут рассмотрены методы, которые используются в современных системах передачи информации их преимущества, недостатки, а также способы решения задачи синхронизации в сложных цифровых системах, в момент приема функция с минимальным уровнем боковых лепестков и максимально отличимым главным пиком. Обеспечение данного условия уже говорит о том, что канала связи будет обеспечен должной корреляционным характеристиками.

### **II. Коды Баркера**

Одним из ярких примеров такого критерия служат коды Баркера. Они представляют собой тип последовательностей двоичных кодов, которые широко используются в радиолокационных системах благодаря их низкой автокорреляции позволяет легко обнаружить кодовую последовательность даже при наличии шума и помех в общем виде код Баркера представляет собой последовательность длины  $n$ .

Где  $n$  – это длина последовательности, а общий вид автокорреляционной функции (АКФ) 7, 1, 1, 1, 1, 1, 1. Чаще всего используются  $n = 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13$

В научных трудах по поиску импульсных дискретных последовательностей [1] особое внимание уделяется кодам Баркера из-за минимального уровня боковых лепестков АКФ.

К недостаткам можно отнести, что для наилучшего обеспечения минимального уровня боковых лепестков АКФ, требуется относительно большая длительность импульса

для достижения высокого результата по дальности, в следствии чего это увеличивает риск возникновения помех от других источников, кроме того они чувствительны к фазам сдвигам, так как они основаны на точном временном и фазовом соотношении между передаваемой кодовой последовательностью и принятым сигналом. Любое отклонение фазы принимаемого сигнала может вызвать ошибки в процессе декодирования, что приведет к снижению общей производительности системы связи.

### **III. М-последовательности, коды Голда, Касами**

М-последовательности – это разновидности псевдослучайной двоичной последовательности (ПСП). В радиолокационных системах используются для генерации сильно сжатого во времени сигнала. Они генерируются с использованием сдвигового регистра с обратной связью и обладают свойством быть как детерминированными, так и статистически случайным. Метод формирования  $m$ -последовательностей включает выбор примитивного многочлена над двоичным полиномом, а затем его использование для генерации последовательности двоичных кодов с помощью сдвигового регистра с обратной связью. Результирующая последовательность обладает свойством максимальной длины и сбалансированности, что означает, что она содержит равное количество нулей и единиц.

М-последовательности получили свое практическое применение для формирования широкополосных сигналов, а также формируемые на их основе коды Голда, Касами [2]. Корреляционные функции таких последовательностей имеют уровень боковых лепестков отличных от нуля из-за чего качество основных характеристик систем, использующих широкополосные сигналы ухудшаются, а именно уменьшается точность измерения параметров канала связи [2].

Коды Голда и Касами являются передовыми методами генерирования ПСП на основе М-последовательностей. Их основной задачей является устранение недостатков корреляционной функции и улучшение безопасности канала передачи информации.

Коды Голда генерируются путем объединения двух  $m$ -последовательностей разной длины с использованием сложения по модулю 2. Результирующая последовательность имеет хорошие корреляционные свойства и более безопасна, чем одна  $m$ -последовательность. Коды Голда широко используются в системах множественного доступа с кодовым разделением канала, таких как Global Positioning System (GPS), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) и др [3].

Коды Касами похожи на коды Голда, но в них используется другой метод комбинирования, в результате чего получается последовательность с еще лучшими корреляционными свойствами. Они обычно используются в системах спутниковой связи и других приложениях, где требуется высокий уровень безопасности.

Главным недостатком данных моделей является трудоемкость синтеза ансамблей кодов Голда и Касами на основе полиномов, которые состоят  $m$ -последовательностей. Длина последовательности находится по формуле (1):

$$N = 2n - 1 \quad (1)$$

где  $n$  – целое число, примитивный полином.

Каждой  $m$ -последовательности длины  $N$  соответствует свой примитивный полином степени  $n$ . Ансамбли Голда удается синтезировать не для всех  $m$ -последовательностей требуемой длины. Существует дополнительный метод отбора и общий алгоритм формирования рассмотренный в работе [4].

### **IV. Многофазные последовательности**

Многофазные последовательности — это семейство цифровых последовательностей, представленных в виде комплексных чисел, где каждое число соответствует отдельной фазе,

либо набор комплексных чисел, сдвинутых по времени относительно начального момента синхронизации. Комплексные числа могут быть расположены в матричной или комплексной форме в зависимости от метода их синтеза.

Благодаря их вариативности они получили широкое распространение в системах связи, таких как Long-Term Evolution (LTE), Wireless Fidelity (Wi-Fi) и Bluetooth.

Метод формирования многофазных последовательностей предложенный в [2], а также устройства формирования комплексных последовательностей идеальной периодической автокорреляционной функций (ПАКФ)

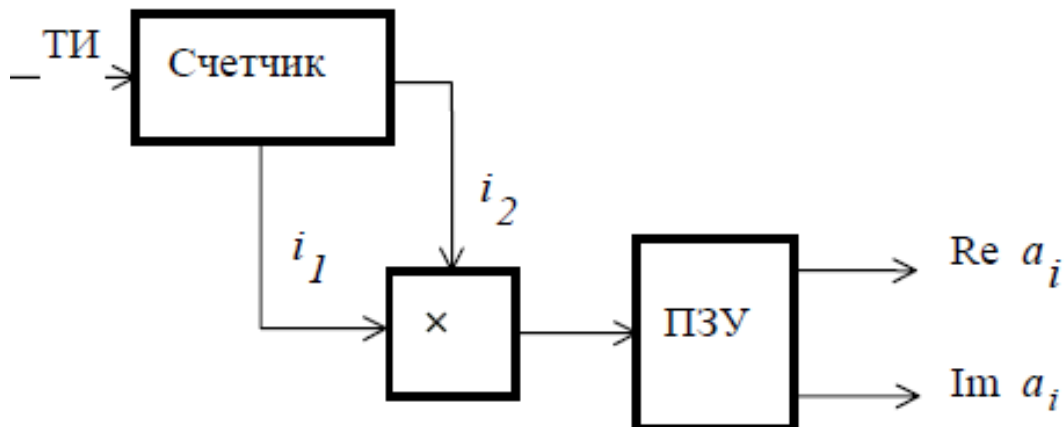


Рис. 1. Устройства формирования комплексных последовательностей

$$w = \exp(-j \frac{2\pi}{2t}) \quad (2)$$

«Устройство содержит двоичный  $2t$  – разрядный счетчик, перемножитель  $t$ -разрядных чисел и постоянно запоминающее устройство, в котором хранятся отсчёты экспоненты  $w$ » [2].

Общим недостатком такого метода служит определенная длина и количество формируемых последовательностей.

Один из эталонных методов первичной синхронизации получили последовательности Задова-Чу, которые используются для первичной синхронизации абонента с базовыми станциями. За счёт нулевого уровня боковых лепестков АКФ [5].

## V. АКФ комплексных последовательностей

Результатом проделанной работы является анализ существующих методов первичной синхронизации для любого канала связи, выявление их недостатков и преимуществ.

Таким образом была сформирована задача поиска таких последовательностей, которые бы решали комплексно вопрос синхронизации. В работе [6] был предложен аналитический метод синтеза последовательностей с идеальной АКФ, в смысле максимальное отношение главного пика к боковым лепесткам.

Полученный метод был использован для моделирования и поиска таких последовательностей в программной среде MatLab. Затем была взята одна из последовательностей длиной 8 и смоделирована её АКФ, затем интерполирована для дальнейшей фильтрации и отсекаания переходных искажений.

На рис.2. представлен результат, полученный в ходе эксперимента.

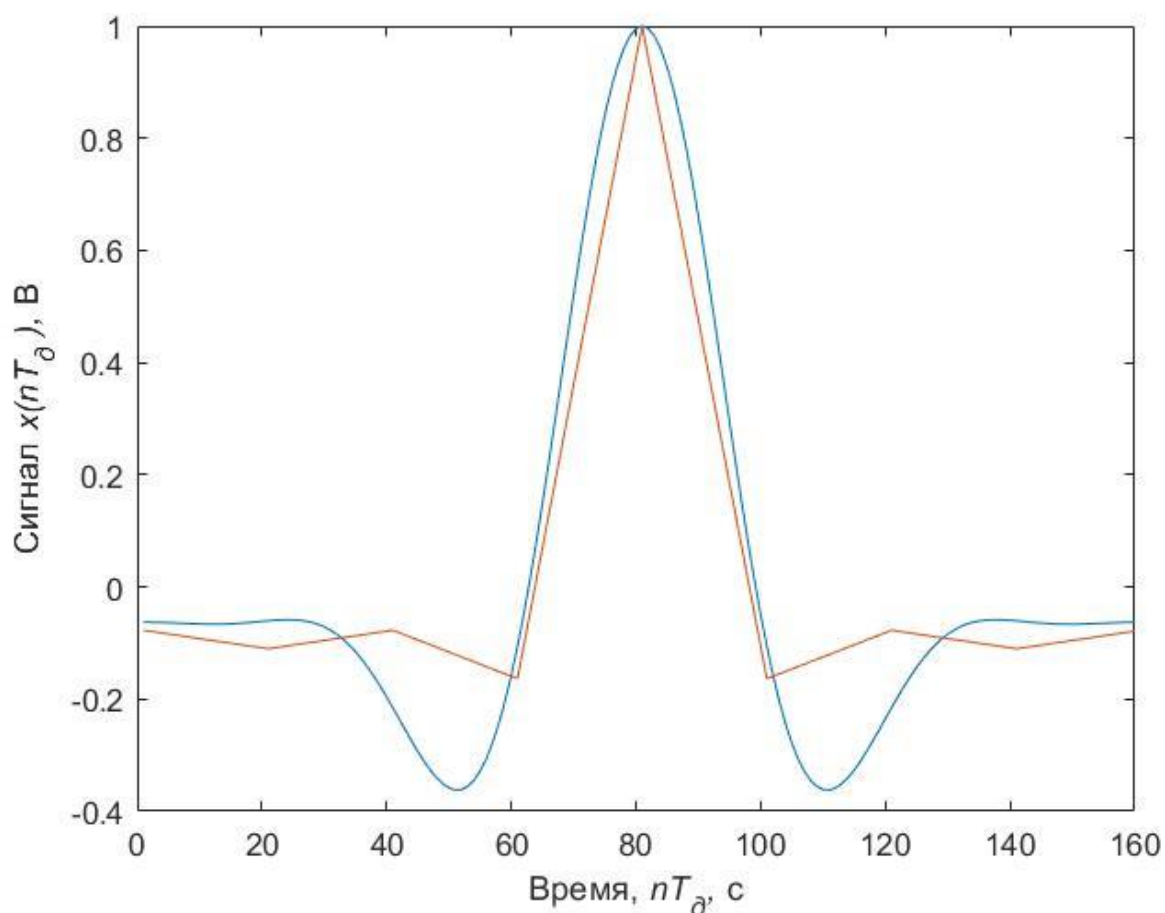


Рис.2. Красным цветом обозначена АКФ до фильтрации, синим после фильтрации

## VI. Заключение

Полученный результат говорит о том, что комплексные последовательности такого вида могут быть использована в качестве первичного синхросигнала в беспроводных системах передачи информации. Требуется дальнейший анализ комплексных последовательностей разной длины.

Научный руководитель: доц., д.т.н., Грицутенко Станислав Семенович, Омский государственный университет путей сообщения.

## Библиографический список

1. Леухин А. Н., Парсаев Н. В. Общий подход к построению фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 6. С.5–12.
2. Дворников В.Д. Многофазные последовательности с идеальными корреляционными свойствами // Доклады БГУИР, 2003. Т. 1, №1. С.111–114.
3. Beard С., Stallings W. Wireless Communication Networks and Systems. London, Pearson, 2016, 642 p.
4. Зубарев В. Ю, Понаморенко Б. В., Шанин Е. Г., Вострецов А. Г. Построение минимаксных ансамблей аperiodических кодов Голда // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т.23. №2. С.26–37.

5. Киселева Т. П. Применение квантования многофазных последовательностей для повышения эффективности их приема и обработки в технологии LTE // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №6. С. 4–12.

6. Грицуненко С. С., Шуленин А. А. Новые комплексные последовательности с отрицательными боковыми лепестками автокорреляционной функции // Инновации. Наука. Образование. 2020. №24. С 1247–1254.

*Дата поступления статьи: 02.04.2023*

*Дата одобрения после рецензирования: 05.04.2023*

*Дата принятия к публикации: 19.06.23*

© А. А. Шуленин, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ФИЗИКА МАТЕРИАЛОВ

1. *В. О. Алексенко, Д. Г. Буслевич, Ц. Ло, С. В. Панин*  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия  
ВЛИЯНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЁНКИ ПЕРЕНОСА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПИ И ПЭИ В ТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ.....3
2. *Г. А. Болякно<sup>1</sup>, В. С. Ковивчак<sup>1,2</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский научный центр СО РАН, г. Омск, Россия  
ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
НА ХЛОРИРОВАННЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН.....9
3. *Д. Н. Бухаров*  
Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУР  
ДИОКСИДА ТИТАНА.....12
4. *А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов, А. В. Оконешникова, И. С. Макаров*  
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия  
Триботехнические свойства полимерных композиционных  
материалов на основе СВМПЭ с комбинированными  
наполнителями.....15
5. *А. В. Вербицкий<sup>1</sup>, А. А. Теплоухов<sup>1</sup>, Н. А. Семенюк<sup>1</sup>, С. А. Сычёв<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный университет, г. Омск, Россия  
ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ  
ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА С КОБАЛЬТОВОЙ СВЯЗКОЙ.....18
6. *А. Д. Гусакова<sup>1</sup>, Ю. В. Кузнецова<sup>2</sup>, А. А. Мальцева<sup>1</sup>, О.С. Спасова<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХОКСИ  
ВАНАДИЯ.....22
7. *С. Н. Данилова<sup>1</sup>, С. Б. Ярусова<sup>2</sup>, П. С. Гордиенко<sup>2</sup>, А. А. Охлопкова<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия  
<sup>2</sup>Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия  
ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛЛАСТОНИТА ИГОЛЬЧАТОГО ГАБИТУСА В КАЧЕСТВЕ  
МОДИФИКАТОРА  
СВМПЭ.....24
8. *Е. А. Домичек, В. К. Волкова, Е. А. Рогачев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ  
АВТОМАТИЧЕСКИМ ИЛИ РУЧНЫМ СПОСОБОМ.....28



9. *Л. Ю. Дробот, Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова*  
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАПОЛНЕННОГО КОКСОМ  
ВТОРИЧНОГО ФТОРОПЛАСТА-4 ПОСЛЕ ВЗРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ.....31
10. *А. А. Жуковская<sup>1</sup>, А. П. Солоненко<sup>1</sup>, А. Е. Шевченко<sup>1</sup>, П. А. Шабанова<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА ЦИНКА В ГРАНУЛАХ ИЗ ВОЛЛАСТОНИТА НА  
ВЕЛИЧИНУ МИКРОТВЁРДОСТИ.....34
11. *Ю. В. Капитонова, А. А. Охлопкова*  
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия  
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА  
ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И СЛОИСТЫХ СИЛИКАТОВ.....37
12. *Я. А. Ковалёва, А. С. Брундуков*  
Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии  
наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь  
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОМПРЕССОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ.....42
13. *Е. С. Колесова, О. В. Гоголева*  
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия  
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНОГО НАНОАЛМАЗА НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ  
СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА.....46
14. *Б.С. Кудряшов<sup>1,2</sup>, А.Е. Резванова<sup>1</sup>, А.Н. Пономарев<sup>1</sup>, М.В. Петрухин<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской  
академии наук, г. Томск, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия  
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ БИОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА.....50
15. *А. В. Мамонтова, Н. Г. Эйсмонт*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ МАТЕРИАЛОВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ  
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ.....52
16. *М. А. Маркова, П. Н. Петрова*  
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия  
ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО  
КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА.....55
17. *М. А. Маркова, П. Н. Петрова, Р. С. Тихонов*  
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ RV-ФАКТОРА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА.....61

18. *И. Л. Панов<sup>1,2,3</sup>, Н. Ю. Гришаева<sup>2</sup>, Б. А. Люшин<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

КОНСТРУИРОВАНИЕ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....66

19. *Д. В. Постников, И. С. Кочнев*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЯХ.....71

20. *А. Е. Резванова<sup>1</sup>, А. Н. Пономарев<sup>1</sup>, Б. С. Кудряшов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ «ГИДРОКСИАПАТИТ – МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ».....75

21. *Е. А. Рогачев<sup>1</sup>, О. В. Малий<sup>1</sup>, Д. Н. Маркова<sup>1</sup>, Н. А. Погорелова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СУШКИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ЕЕ МОРФО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....78

22. *А. П. Сазанков, С. В. Шилько, Т. В. Дробыш*

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ КАК ПРИЧИНА РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....83

23. *Д.В. Скакун<sup>1</sup>, А.А. Теплоухов<sup>1</sup>, Н.А. Семенюк<sup>1</sup>, А.Г. Закалина<sup>1</sup>, Г.М. Серопян<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ КЕРАМИК НА МИКРОТВЕРДОСТЬ.....88

24. *В. А. Стратанович, А. П. Сазанков, Д. В. Брель*

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ.....91

25. Тянь Дэфан<sup>1</sup>, В. О. Алексенко<sup>2</sup>, Д. Ю. Степанов<sup>2</sup>, А. В. Бяков<sup>2</sup>, Д. Г. Буслович<sup>2</sup>, С. В. Панин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПЛАСТИН ПЭЭК И ПРЕПРЕГА ИЗ УВ-ТКАНИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....95

26. А. Р. Халдеева, М. Л. Давыдова, А. Ф. Федорова, М. Д. Соколова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

ВЛИЯНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА РЕЗИН НА ОСНОВЕ HYDRIN T6000.....100

27. А. Е. Шестериков, Д. А. Шестерикова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ЗОЛОТА И ОЛОВА В ПРОГРАММАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....104

28. И. С. Шилько<sup>1</sup>, А. П. Сазанков<sup>1</sup>, А. С. Брундуков<sup>1</sup>, Д. В. Брель<sup>1</sup>, А. А. Богданов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ МЕТОДОМ КОНТАКТНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ.....108

## Секция НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

1. С. В. Балакирев, Д. В. Кириченко, Н. Е. Черненко, Н. А. Шандыба, М. С. Солодовник

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

КАПЕЛЬНАЯ ЭПИТАКСИЯ СЕЛЕКТИВНО-ПОЗИЦИОНИРОВАННЫХ НАНОСТРУКТУР In/GaAs(001) С ПЕРЕМЕННЫМ РАССТОЯНИЕМ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ.....113

2. А. В. Балахнин

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ГРАФЕН/MoS<sub>2</sub>.....118

3. Т. М. Гомонюк

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ ГИБРИДНОГО АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОТОТИПОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ.....123

4. *О. В. Дубовик, Т. В. Смородина, К. А. Белоус, В. В. Калинин*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УГЛЕРОДА.....128
5. *А. Р. Закранцов, И. В. Мишин, А. В. Матюков, А. А. Тарасова, Н.А. Семенюк*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ  
НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ И УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА.....133
6. *В. Н. Ильина, С. В. Ильин, В. А. Гафарова, И. Р. Кузеев*  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия  
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТА НА ЭПОКСИДНОЙ ОСНОВЕ, МОДИФИЦИРОВАННОГО  
ФУЛЛЕРЕНАМИ И КЕРОСИНОМ, СОДЕРЖАЩИМ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ  
ОКСИДА ЖЕЛЕЗА, ДЛЯ ЗАДЕЛКИ ТРЕЩИН.....138
7. *А. А. Каленчук, В. В. Даньшина, В. А. Булашева*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КЛЕТОК МИКРООРГАНИЗМОВ.....143
8. *Е. А. Лахина, Н. Е. Черненко, Д. В. Кириченко, Н. А. Шандыба, С. В. Балакирев,  
М. С. Солодовник*  
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный  
университет, г. Таганрог, Россия  
ФОРМИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО  
КАПЕЛЬНОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ КВАНТОВЫХ  
ТОЧЕК.....148
9. *Г. Р. Павлов*  
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия  
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЛЕНТЫ  $MoS_2$ .....154
10. *Д.А. Ставров*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ  
СПЕКТРОСКОПИИ.....158

#### Секция РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

1. *А. В. Агапитов<sup>1,2</sup>*  
<sup>1</sup>ООО «НТФ «МИКРОНИКС», г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОПАРАМЕТРОВ.....163

2. <i>Е. А. Аржанова</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДУЛЯ СБОРА КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....	167
3. <i>В. В. Боровиков, В. Н. Кемский</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия РАЗРАБОТКА МАЛОЗАМЕТНОЙ ПРИЗЕМНОЙ АНТЕННЫ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН.....	171
4. <i>А. Л. Григорьев, А. И. Одинец</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ГЕНЕРАТОР ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.....	177
5. <i>В. А. Дышлевский</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА.....	181
6. <i>Н. М. Жилин</i> Омский государственный университет, г. Омск, Россия ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРОВ НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ.....	185
7. <i>С. В. Иксанов</i> АО «ОНИИП», г. Омск, Россия Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЕЙ ПИТАНИЯ.....	190
8. <i>С. В. Иксанов</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	193
9. <i>Н. И. Кульков, И. В. Хоменко</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ФИЛЬТР ГАРМОНИК ДЛЯ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА.....	198
10. <i>Д. А. Мазунов, Р. Ю. Гошля, А. Г. Шкаев</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК.....	203
11. <i>И. К. Манохин</i> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА СЕЛЕКЦИИ ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ ПЛИС: МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	209

12. *М. Т. Нгуен, А. Алхадж Хасан*  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия  
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ АНТЕНН.....213
13. *М. А. Рябова<sup>1,2</sup>, А. Б. Ионов<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>ПАО «Сатурн», г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ПОГРЕШНОСТЬ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....219
14. *П. П. Снетков, А. Е. Максимов, С. П. Куксенко*  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия  
О ВЛИЯНИИ ЗАКРУГЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ СВЯЗАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА МАТРИЦЫ ЕЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ.....224
15. *А. С. Старков<sup>1,2</sup>, В. И. Левченко<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>АО «ОНИИП», г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЫСОКОЧАСТНОГО НАГРУЗОЧНОГО БЛОКА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ.....228
16. *Р. В. Степанов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОБЛУЧЕНИИ.....234
17. *Я. А. Сурков*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В МОБИЛЬНЫХ РАДАРНЫХ УСТАНОВКАХ С ЦЕЛЬЮ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И ПЫЛЬНЫХ БУРЬ.....237
18. *Д. А. Титов, А. С. Табакова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В УСТРОЙСТВАХ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ.....  
241
19. *М. С. Федорова*  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА НА ЛОКАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА.....246
20. *В. А. Флатун, А. И. Одинец*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРИНЦИП РАБОТЫ ФОТО- И ВИДЕОКАМЕРЫ.....251

21. *В. В. Чинчин, А. И. Одинец*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИИ.....255
22. *К. И. Шерстобитов, А. И. Одинец*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ».....259
23. *Д. Н. Шлома*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАЗРАБОТКА ВНУТРИЖЕЛУДОЧНОГО БОЛЮСА ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНОЙ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ ОСОБЕЙ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА.....263

### Секция **ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

1. *Д. Е. Абдурахманова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ УЯЗВИМОСТЯМИ НА 2023  
ГОД.....268
2. *Т. А. Алексенко*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НА ПРЕДМЕТ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ.....273
3. *А. Е. Барщук*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ШЛЮЗОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ СЕТЕВЫХ  
УГРОЗ (UTM/NGFW-РЕШЕНИЙ).....278
4. *Д. И. Ворм*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ВИРУСОВ НА ГРАФАХ С РАЗНЫМ  
КОЛИЧЕСТВОМ УЗЛОВ.....282
5. *С. А. Дорогов, Е. В. Трапезников*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
МЕТОД СОКРЫТИЯ ДАННЫХ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ СКРЫТОГО ФАЙЛОВОГО  
КОНТЕЙНЕРА.....286
6. *В. И. Зуева*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
О ПРИМЕНЕНИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УДАЛЕННЫХ  
ДАННЫХ С USB-НАКОПИТЕЛЯ.....291
7. *В. С. Игнатов, А. Е. Самогуга*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ КОНФИГУРАЦИЙ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ В ОПЕРАЦИОННОЙ  
СИСТЕМЕ ASTRA LINUX.....296

8. *А. С. Кавун*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
МОДЕЛИРОВАНИЕ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....300
9. *Т. С. Казбеков*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
СРАВНЕНИЕ СЛУЖБЫ КАТАЛОГОВ MICROSOFT ACTIVE DIRECTORY С  
АНАЛОГАМИ .....305
10. *А. А. Косов, В. Ю. Малий*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
СТЕГАНОГРАФИЯ. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА КОХА-ЖАО НА  
ИЗОБРАЖЕНИЕ.....309
11. *И. В. Лопаткин*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО МАКЕТА-ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ  
ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАССЛЕДОВАНИЮ ИНЦИДЕНТОВ.....313
12. *А. А. Маслова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОДХОДА К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПЕРИМЕТРА СЕТИ С  
ПОМОЩЬЮ INFOWATCH ARMA.....317
13. *А. А. Набатова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ОБЗОР ИНЦИДЕНТОВ, СВЯЗАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВРЕДОНОСНОГО  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ЗА 2021-2022 ГОДЫ.....321
14. *И. И. Охотникова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРИМЕНЕНИЕ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП  
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ.....326
15. *Э. Н. Садыкова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....330
16. *А. Е. Сулавко<sup>1</sup>, И. Е. Панфилова<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия  
ВЕРИФИКАЦИЯ ЛИЧНОСТИ СУБЪЕКТОВ ПО ЛИЦУ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ  
ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «БИОМЕТРИЯ-  
КОД».....336



17. *Е. К. Титова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДО ОТКАЗА БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МАРКОВСКИХ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ.....340

18. *В. С. Шабанов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ ПРАВИЛ НОРМАЛИЗАЦИИ И КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ СИМ-  
СИСТЕМ И ЕГО АПРОБАЦИЯ .....345

#### Секция **ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

1. *А. В. Агапитов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ СО  
ВСТРОЕННЫМИ РСВ-АНТЕННАМИ.....352

2. *Т. М. Баязитов, И. В. Никонов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
МОБИЛЬНЫЕ СЕТИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ.....355

3. *А. С. Бондаренко*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ FSK-МОДЕМА .....359

4. *Е. А. Брониковский*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА  
СПУТНИКОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ.....363

5. *Д. В. Галуза*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РАДИОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ  
МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....368

6. *А. В. Гетман, А. Р. Закирова*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
VOLTE: ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ВНЕДРЕНИЯ ДЛЯ  
УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОЛОСОВЫХ ВЫЗОВОВ.....373

7. *М. В. Ермаков, А. П. Аверченко*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ УСТРОЙСТВА ПЛАТЫ DATA CONVERSION HSMC ДЛЯ РАЗРАБОТКИ  
ПРОЕКТА ПЛИС ДЛЯ ПРИЕМА АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА.....377

8. *А. Р. Закирова., А. В. Гетман*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОКОЛА L2TP ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ ЧАСТНОЙ  
СЕТИ.....382

9. *Ю. Ю. Крахоткин*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
БОРЬБА С ПОМЕХАМИ МЕТОДОМ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ.....386
10. *Б. А. Кусаинов, М. В. Русских*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦРРЛ НА УЧАСТКЕ «ОМСК–КОРМИЛОВКА».....389
11. *Е. С. Ласунов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....393
12. *Д. И. Ломтев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЯЮЩИМ СРЕДАМ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ.....398
13. *И. С. Лутченко*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАЩИЩЕННОЙ СЕТИ СВЯЗИ.....402
14. *Д. А. Марков*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ОСНОВНЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE, ВЛИЯЮЩИЕ НА КЛИЕНТСКИЙ ОПЫТ.....406
15. *Д. А. Медников*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
КОМБИНИРОВАННАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....411
16. *М. И. Минеева*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА АУДИОСИГНАЛА И РЕЧИ.....416
17. *Д. М. Мочалов, Д. В. Клюкин*  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия  
ОБ УСКОРЕНИИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА АНТЕНН МЕТОДОМ МОМЕНТОВ.....421
18. *А. И. Набоко*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СВЯЗИ ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА 802.11.....424
19. *Я. А. Петриев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ.....428

20. *М. С. Погребной, Г. И. Грачев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАЗРАБОТКА АНТЕННЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН  
ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....431
21. *М. М. Подрясов, Н. И. Горлов*  
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г.  
Новосибирск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО  
ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ОПТОВОЛОКОННЫМ СИСТЕМАМ ПЕРЕДАЧ.....435
22. *В. О. Семина, И. Ю. Сагадеева*  
МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия  
ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ В РОССИИ.....440
23. *Е. А. Сысолятин*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
МОДЕМ С ДВОЙНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО-ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ.....444
24. *А. А. Усаченко*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦРРЛ НА УЧАСТКЕ «ПЕТРОПАВЛОВСК–МАМЛЮТКА».....448
25. *С. С. Хомушку*  
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г.  
Новосибирск, Россия  
ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ  
НА ОСНОВЕ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ.....452
26. *А. Н. Штоль*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ SincNET ДЛЯ  
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО ГОЛОСУ.....457
27. *А. А. Шуленин*  
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия  
КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ИХ РОЛЬ В СРЕДСТВАХ СВЯЗИ.....462